

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Агафонов Александр Викторович

Должность: директор филиала

Дата подписания: 19.06.2025 22:52:49

Уникальный программный ключ:

2539477a8ecf706dc9cff164bc411eb6d3c4ab06

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ЧЕБОКСАРСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) МОСКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Кафедра «Информационные технологии, электроэнергетика и системы
управления»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор филиала

А.В. Агафонов

« 28 » мая 2021 г.

Спецразделы ТОЭ

(наименование дисциплины)

Методические указания по выполнению курсовой работы

Направление
подготовки

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(код и наименование направления подготовки)

Направленность
(профиль) подготовки

«Электроснабжение»

(наименование профиля подготовки)

Квалификация
выпускника

бакалавр

Форма обучения

очная, заочная

Год начала обучения

2021

Чебоксары, 2021

Методические указания разработаны

в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Автор Лепав Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационные технологии, электроэнергетика и системы управления»

(указать ФИО, ученую степень, ученое звание или должность)

Методические указания одобрены на заседании кафедры «Информационные технологии, электроэнергетика и системы управления» (протокол № 9 от 17.04.2021 г.).

В Методических указаниях изложены методология и методика подготовки курсовых работ, а также требования к их оформлению; даны рекомендации студентам по их защите.

Методические указания предназначены для руководителей курсовых работ, а также для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Чебоксарском институте (филиале) Московского политехнического университета.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	Ошибка! Закладка не определена.
2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ.....	Ошибка! Закладка не определена.
3. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.1. Определение параметров пассивного четырехполюсника и усилителя.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2. Расчет коэффициентов передачи четырехполюсников и их каскадного соединения.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.3. Анализ цепи в переходном режиме.....	Ошибка! Закладка не определена.
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1. Составление расчетной схемы.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.2. Пример расчета переходного процесса классическим методом.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.3. Пример расчета свободной составляющей напряжения операторным методом.....	Ошибка! Закладка не определена.
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНОГО ПАКЕТА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	35
6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В ИНЖЕНЕРНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ MATHCAD	
7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНОГО ПАКЕТА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	39

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа по дисциплинам: «Спецразделы ТОЭ» – предназначена для студентов очной и заочной формы обучения инженерно-технических специальностей и является завершающим этапом изучения курса.

Предлагаемая курсовая работа содержит задания на расчет установившегося режима в цепи с гармоническим источником ЭДС при наличии двухполюсников и четырехполюсников, исследование частотных характеристик цепей и расчет переходного режима. Студенту выдается индивидуальная распечатка с топологией расчетной схемы и цифровыми данными, на основании которой определяются параметры пассивного и активного четырехполюсников, их каскадного соединения. Расчет проводится на заданной частоте. Далее исследуется частотная характеристика коэффициента передачи напряжения для обоснования фильтрующих свойств цепи. Расчет переходного процесса позволяет анализировать прохождение сигнала по исследуемой цепи при подключении ее к источнику гармонического напряжения.

В отличие от предыдущих изданий настоящая работа содержит раздел исследования частотных характеристик и переходного процесса в электрической цепи с применением стандартного пакета схемотехнического моделирования Electronics Workbench 5.12 (EWB).

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Предлагаемая курсовая работа является завершающим этапом изучения курса и преследует следующие цели:

- приобретение практических навыков теоретического анализа электрической цепи с усилительными элементами;
- закрепление, углубление и расширение знаний по основным разделам курса;
- применение компьютерных технологий для расчета и анализа электрических цепей.

Курсовая работа охватывает следующие разделы курсов «Электротехника», «Общая электротехника», «Электротехника и электроника», «Спецглавы электричества» и «Основы теории цепей»: методы расчета сложных цепей, анализ цепей во временной и частотной областях, методы расчета переходных процессов.

1.1. Задание на курсовую работу

Задание на курсовую работу каждый студент получает индивидуально и в ходе ее выполнения должен самостоятельно осмыслить поставленную задачу и найти пути ее решения, применяя знания, полученные на других видах занятий.

1.2. Порядок оформления курсовой работы

Курсовая работа выполняется на компьютере на стандартных листах А4. Текст печатается на одной стороне листа. На странице должно **располагаться 28-30 строк, каждая из которых содержит 60-65 знаков, включая пробелы. Междустрочный интервал – 1,5, шрифт текста – 14 (Times New Roman), в таблицах - 12, в подстрочных сносках -10.** Текст печатается строчными буквами (кроме заглавных), выравнивается по ширине с использованием переносов слов. На титульном листе надпись: курсовая работа печатаются 18 шрифтом. Подчеркивание слов и выделение их курсивом внутри самой работы не допускается. Однако заголовки и подзаголовки при печатании текста письменной работы выделяются полужирным шрифтом. Абзацный отступ должен **соответствовать 1,25 см** и быть одинаковым по всей работе.

Ориентировочный объем курсовой работы составляет **25-35 страниц**. В данный объем не входят приложения и список использованных источников. По согласованию с преподавателем объем работы может быть увеличен.

Страницы, на которых излагается текст, должны иметь поля: **левое -30 мм, правое - 10 мм, верхнее - 20 мм, нижнее - 20 мм.**

В тексте работы «Введение», название глав, «Заключение» и «Список использованной литературы» печатаются (начинаются) с новой страницы.

Расстояние между заголовком и подзаголовком, заголовком и последующим текстом, подзаголовком и предыдущим текстом отделяют двумя полуторными межстрочными интервалами, а между подзаголовком и последующим текстом -

одним полуторным межстрочным интервалом.

Главы письменных работ нумеруются арабскими цифрами и должны начинаться с новой страницы (листа). Номер главы состоит из числа: 1, 2 и т.д.

Заголовки (подзаголовки) располагаются центрированным (посередине текста) способом.

Страницы письменных работ должны иметь сквозную нумерацию арабскими цифрами по всему тексту. Номер страницы проставляют в внизу поля страницы по центру без точки в конце. Первой страницей письменной работы является титульный лист. Он не нумеруется. В работе второй страницей является содержание.

Титульный лист должен содержать наименование учебного заведения, формы обучения, обозначение характера работы (курсовая), ее тему, фамилию, имя, отчество выполнившего ее студента, номер курса и группы, ученую степень, должность или ученое звание научного руководителя, его фамилию и инициалы, графы «Дата сдачи», «Допустить к защите», «Дата защиты», «Оценка», место и год написания работы.

Оглавление работы, которое следует после титульного листа, должно содержать названия элементов структуры работы и номера листов, с которых они начинаются.

При использовании литературы и цитировании отдельных научных положений студент обязан осуществлять в сносках ссылки на авторов и источники, откуда он заимствует материал (фамилия и инициалы автора, название работы, место и год издания, конкретная страница, откуда заимствована цитата). При этом цитирование допускается только в ограниченном объеме, оправданном целью цитирования (для обоснования актуальности рассматриваемого вопроса; демонстрации различных взглядов, существующих в науке по проблемам темы, подтверждения или опровержения выдвигаемых студентом тезисов и т.п.).

Прямое цитирование в тексте обязательно оформляется с помощью кавычек. В случае буквального воспроизведения положений научных трудов без указания на их названия и авторов курсовая работа к защите не допускается.

В списке использованных источников должны быть указаны только те материалы, на которые имеется ссылка (сноска) в работе.

Если в курсовой работе имеются приложения, их необходимо пронумеровать. Все листы курсовой работы должны быть пронумерованы.

Нумерация страниц в курсовой работе должна быть сплошной. Студент отвечает за грамотность и аккуратность оформления курсовой работы.

Наличие грамматических, орфографических и пунктуационных ошибок либо небрежное оформление работы может послужить причиной неудовлетворительной оценки работы.

Порядок представления курсовой работы на защиту

Курсовая работа, подготовленная студентом в окончательной форме, должна быть представлена делопроизводителю кафедры в следующем комплекте:

в письменной форме в прошитом, сброшюрованном или скрепленном виде – 1 экземпляр;

в электронной форме посредством направления на электронный почтовый адрес кафедры транспортно-энергетических систем ttm@chebpolytech.ru – 1 экземпляр.

Делопроизводитель кафедры после регистрации факта и даты сдачи курсовой работы передает ее для проверки научным руководителем.

Передача курсовой работы в электронной форме может быть осуществлена путем направления ее студентом непосредственно научному руководителю по электронной почте.

После поступления курсовой работы на кафедру научный руководитель проверяет ее в течение 14 календарных дней с момента поступления на кафедру, после чего возвращает ее делопроизводителю со своим отзывом. В отзыве указываются следующие положения:

- наименование учебного заведения, кафедры, формы обучения;
- обозначение характера работы (курсовая), ее тему;
- фамилию, имя, отчество выполнившего ее студента, номер курса и группы;
- ученую степень, должность или ученое звание научного руководителя, его фамилию и инициалы;
- соответствие представленной курсовой работы общим требованиям, указанным в настоящих Методических рекомендациях;
- указание на имеющиеся в курсовой работе недостатки (как по форме, так и по содержанию работы), не препятствующие допуску работы к защите;
- вывод о возможности допуска курсовой работы к защите.

В случае если поставленные научным руководителем вопросы не ясны студенту, он вправе уточнить их у научного руководителя лично во время его еженедельных консультаций (дежурств на кафедре) или дистанционно через электронную почту.

В случае формулирования научным руководителем вывода о невозможности допуска курсовой работы к защите курсовая работа подлежит подготовке заново с учетом замечаний, указанных научным руководителем, и повторному представлению на защиту в порядке, предусмотренном разделами 3-5, тому же научному руководителю.

Порядок защиты курсовой работы

Защита курсовой работы может проводиться только научному руководителю.

Защита курсовой работы проводится в форме, установленной научным руководителем. При устной форме защиты курсовой работы студент должен подготовить ответы на вопросы, поставленные ему научным руководителем в рецензии.

Научный руководитель вправе по своему усмотрению задавать студенту дополнительные вопросы для проверки уровня и качества освоения им знаний по теме курсовой работы, а также для дополнительной проверки самостоятельности выполнения курсовой работы.

По итогам защиты научный руководитель определяет, может ли быть защита зачтена, или требуется повторная защита.

По итогам первоначальной или (в случае ее неудачи) повторной защиты курсовой работы научный руководитель ставит отметку о защите курсовой работы в

зачетной книжке студента, в ведомости и на титульном листе работы.

После защиты рецензия и курсовая работа подлежит сканированию самим студентом и заливке в Электронную информационно-образовательную среду (Электронное портфолио) Чебоксарского института (филиала) Московского политехнического университета по адресу <http://students.polytech21.ru/login.php>, после чего работа в письменной форме передаются студентом делопроизводителю для хранения в архиве Филиала.

2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

В работе исследуются установившийся и переходный режимы в электрической цепи, изображенной на рис. 2.1.

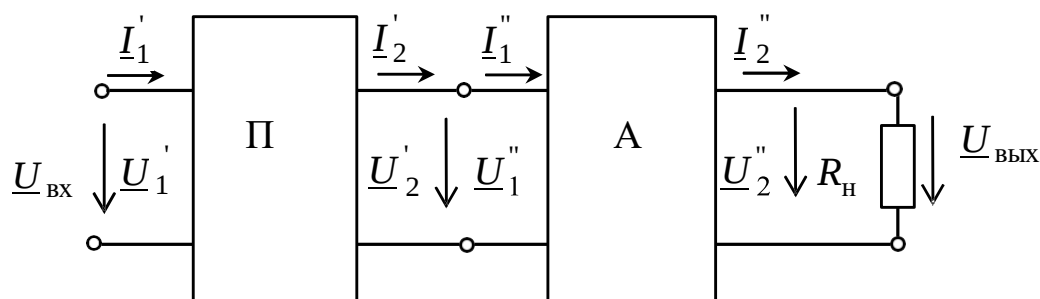


Рис. 2.1

2.1. В соответствии с вариантом задания построить схему пассивного (Π) четырехполюсника (рис. 2.2), содержащего последовательное (Z) или параллельное (Y) соединение резистора R_i и емкости C_i ($i=1,2,3$),

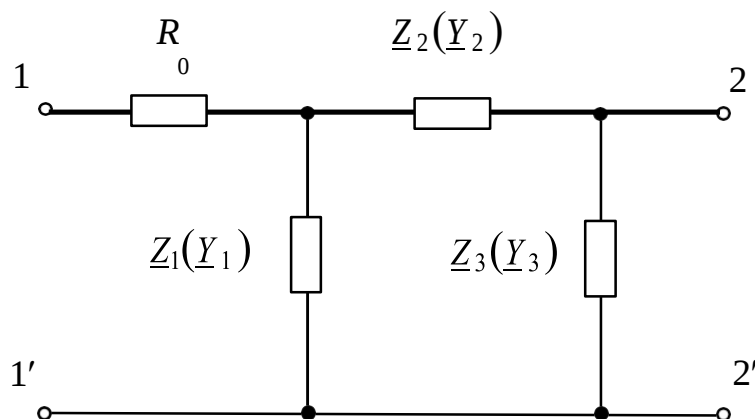


Рис. 2.2

и активного четырехполюсника (усилителя) (А) (рис. 2.3).

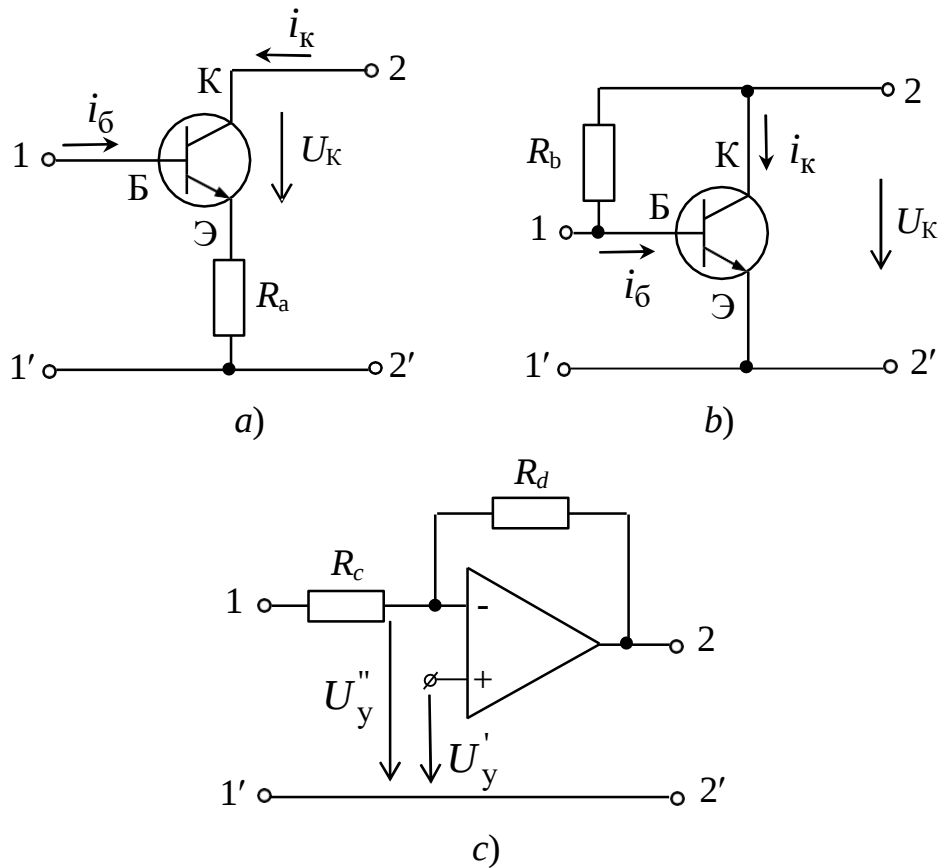


Рис. 2.3

2.2. Записать выражения для A -параметров пассивного четырехполюсника в функции частоты. Рассчитать эти параметры на заданной частоте f . Проверить принцип взаимности.

2.3. Рассчитать A -параметры усилителя, используя линейную схему замещения с зависимыми источниками (рис. 3.4).

Для усилителей на рис. 2.3,а и 2.3,б транзисторы заданы h -параметрами:

$$h_{11} = 10^3 \text{ Ом}, \quad h_{12} = 10^{-4},$$

$$h_{21} = 5 \cdot (n + 10), \quad h_{22} = 10^{-4} \text{ См},$$

а сопротивления $R_a = n$, Ом, $R_b = 100 n$, кОм, где n – номер варианта. Усилитель на рис. 2.3,с содержит идеальный операционный усилитель. Сопротивления выбрать по формулам: $R_c = n$, кОм, $R_d = (n + 10) \cdot 10^2$, кОм.

2.4. Рассчитать A -параметры каскадного соединения пассивного и активного четырехполюсников (рис. 2.1).

2.5. Определить входное сопротивление $R_{\text{вх.А}}$ усилителя, нагруженного на резистор $R_{\text{н}}$. Расчет выполнить двумя способами:

а) путем вычисления отношения напряжения к току на входе усилителя по схеме замещения (рис. 3.4);

б) через A -параметры усилителя.

2.6. Найти коэффициент передачи напряжения $K_{\text{п}}$ пассивного четырехполосника, нагруженного на сопротивление $R_{\text{вх.А}}$.

2.7. Найти коэффициент передачи напряжения $K_{\text{А}}$ активного четырехполосника (усилителя), нагруженного на сопротивление $R_{\text{н}}$.

2.8. Найти коэффициент передачи напряжения K каскадного соединения четырехполосников двумя способами:

а) по A -параметрам каскадного соединения четырехполосников с активной нагрузкой;

б) по коэффициентам передачи $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{А}}$ четырехполосников.

2.9. Рассчитать комплексную частотную характеристику (КЧХ) коэффициента передачи напряжения

$$K_{\text{п}}(j\omega) = K_{\text{п}}(\omega) \cdot e^{j\phi_{\text{п}}(\omega)}.$$

для пассивного четырехполосника, нагруженного на сопротивление $R_{\text{вх.А}}$.

2.10. Рассчитать КЧХ коэффициента передачи напряжения каскадного соединения пассивного и активного четырехполосников

$$K(j\omega) = K_{\text{п}}(j\omega) \cdot K_{\text{А}} = K(\omega) \cdot e^{j\phi(\omega)}.$$

2.11. Построить частотные характеристики АЧХ – $K(\omega)$ и ФЧХ – $\phi(\omega)$ в одной системе координат. Сделать вывод о фильтрующих свойствах цепи, приняв за полосу прозрачности диапазон частот, в котором

$$K(\omega) > \frac{K_{\text{max}}}{\sqrt{2}},$$

где K_{max} – максимальное значение модуля коэффициента передачи напряжения цепи.

2.12. Составить схему для расчета переходного процесса, возникающего при подключении синусоидального источника ЭДС

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_E)$$

к входным зажимам пассивного четырехполюсника (рис. 2.2.), нагруженного на сопротивление $R_{\text{вх.А}}$. Переходной процесс рассчитать на частоте $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$. Найти напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ на резисторе $R_{\text{н}}$ в переходном режиме. Построить на одном графике напряжение входного и выходного сигналов в зависимости от времени.

2.13. Провести расчет частотных характеристик и переходного процесса в исследуемой электрической цепи с применением пакета Electronics Workbench 5.12.(EWB)

2.14. С помощью программы EWB проанализировать, как нужно изменить R или C для улучшения фильтрующих свойств заданного фильтра. Этот пункт выполняется по указанию преподавателя.

3. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Определение параметров пассивного четырехполюсника и усилителя

Для пассивного четырехполюсника (рис. 2.2) А-параметры предлагается рассчитать либо приведением уравнений, составленных по законам Кирхгофа, к виду (3.1), либо по опытам холостого хода и короткого замыкания, а также используя формулы А-параметров для Т-образных и П-образных четырехполюсников.

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}' \underline{U}_2 + \underline{B}' \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{C}' \underline{U}_2 + \underline{D}' \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Например, для П-схемы (рис.3.1 а):

$$\begin{aligned} \underline{A}' &= 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_3; \\ \underline{B}' &= \underline{Z}_2; \\ \underline{C}' &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_1 \underline{Y}_3; \\ \underline{D}' &= 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_1, \end{aligned} \quad (3.2)$$

для Т-схемы (рис.3.1):

$$\begin{aligned}\underline{A}' &= 1 + \underline{Z}_1 \underline{Y}_3; \\ \underline{B}' &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Y}_3; \\ \underline{C}' &= \underline{Y}_3; \\ \underline{D}' &= 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_3.\end{aligned}\tag{3.3}$$

для Г-схемы (рис.3.1 в):

$$\begin{aligned}\underline{A}' &= 1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_2; \\ \underline{B}' &= \underline{Z}_1; \\ \underline{C}' &= 1 / \underline{Z}_2; \\ \underline{D}' &= 1.\end{aligned}\tag{3.4}$$

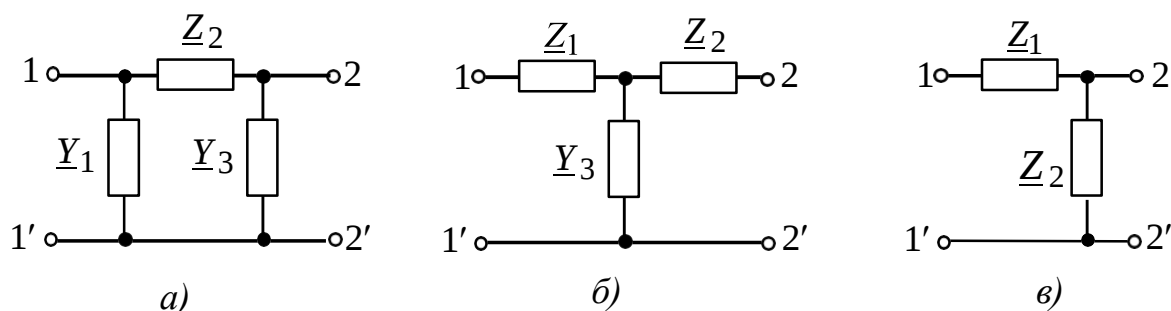


Рис.3.1

При анализе электрических цепей с усилительными элементами (транзисторами, операционными усилителями и т.д.) используют их схемы замещения. Для транзисторов получили распространение физические и формализованные модели (схемы замещения). В физической схеме замещения ее параметры связаны с физическими (собственными) параметрами транзистора (сопротивления эмиттерного, коллекторного переходов и т.д.).

Формализованные схемы замещения транзисторов основаны на его представлении в виде четырехполюсника, который может быть охарактеризован одной из шести систем уравнений, связывающих между собой входные и выходные токи и напряжения. Наиболее широко используется система h -параметров, так как эти параметры легко измерить и определить по ВАХ транзистора:

$$\begin{aligned}U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2' &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2\end{aligned}\tag{3.5}$$

Примечание: в уравнениях типа h ток I_2' направлен внутрь четырехполюсника, в уравнениях типа A ток I_2 направлен на выход четырехполюсника ($I_2 = -I_2'$).

Уравнениям (3.5) соответствует схема замещения транзистора в режиме малого сигнала (рис. 3.2). Усилители (рис. 2.3,а, рис. 2.3,б) содержат кроме транзистора дополнительные сопротивления R_a или R_b , и, соответственно, схема замещения примет вид представленный на рис. 3.4,а, 3.4,б.

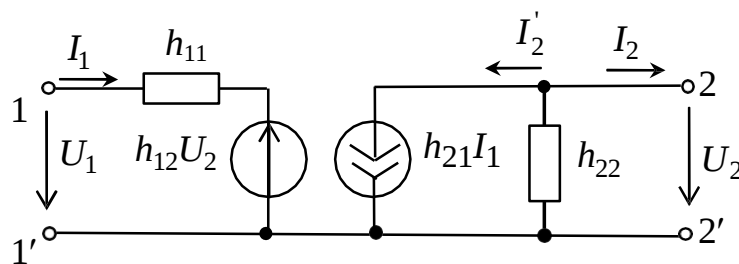


Рис.3.2

A -параметры полученной схемы можно определить двумя способами. Первый способ состоит в получении уравнений, записываемых по законам Кирхгофа, в виде:

$$U_1 = A' U_2 + B' I_2 \quad (3.6)$$

$$I_1 = C' U_2 + D' I_2$$

Для удобства можно рассматривать отдельно режимы холостого хода и короткого замыкания.

Второй способ заключается в определении A -параметров сложного соединения двух четырехполюсников. Для схемы на рис.

2.3 а следует рассмотреть последовательное соединение транзистора (рис. 3.2) и одноэлементного четырехполюсника с сопротивлением R_a (рис. 3.3 а), в результате чего и получается схема (рис. 3.4 а).

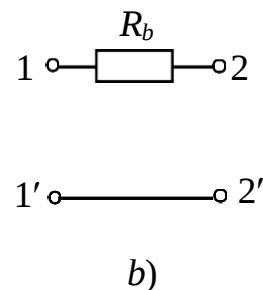
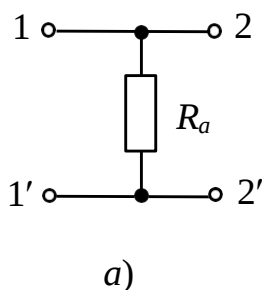


Рис. 3.3

Для схемы на рис. 2.3, *b* необходимо рассмотреть параллельное соединение транзистора (рис. 3.2) и одноэлементного четырехполюсника с сопротивлением R_b (рис. 3.3, *b*), в результате чего и получается схема (рис. 3.4, *b*).

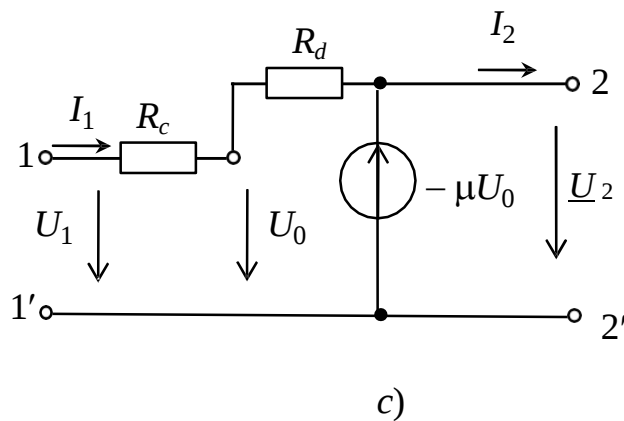
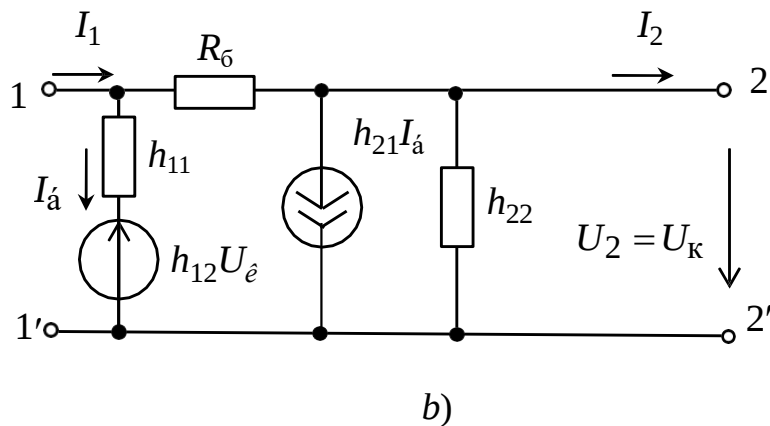
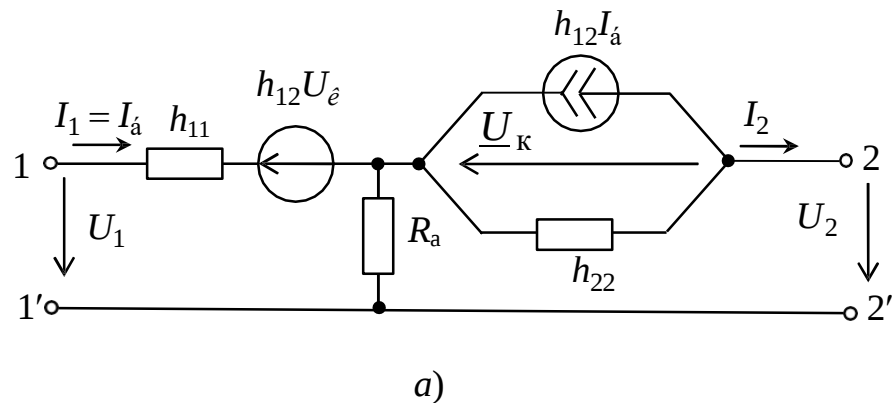


Рис. 3.4

В схеме на рис. 2.3, *c* используется операционный усилитель (ОУ) как идеальный преобразователь мощности типа ИНУН (источник напряжения, управляемый напряжением). Для упрощения расчетов схем с ОУ прибегают к идеализации его параметров:

- бесконечно высокий коэффициент усиления $\mu = \infty$;

- бесконечно большое входное сопротивление $R_{\text{вх.ОУ}} = \infty$;
- малое выходное сопротивление $R_{\text{вых.ОУ}} = 0$.

Как правило, ОУ имеет два входа и один выход. Инвертирующий вход обозначают знаком “–”; сигнал, поданный на этот вход, имеет на выходе противоположную фазу. Неинвертирующий вход обозначается знаком “+” (рис.2.3,с). Кроме указанных сигнальных входов ОУ имеет выводы для подключения источников питания, для установки нулевого напряжения на выходе при $U_{\text{вх}} = 0$, для частотной коррекции и т.д. На рис. 3.4,с представлен инвертирующий усилитель, охваченный цепью параллельной обратной связи по напряжению на резисторах R_c, R_d . Неинвертирующий вход заземлен. При анализе усилительных систем на ОУ принимают следующие упрощающие предположения:

1) входы ОУ не потребляют тока;

2) напряжение между входами ОУ равно нулю.

Последнее предположение следует из того, что при $\mu = \infty$

напряжение на выходе $U_{\text{вых}} = \mu(U'_y - U''_y)$ всегда конечно и по значению меньше напряжения питания, что может иметь место только при $U''_y = U'_y$.

Эквивалентная схема замещения ОУ, удовлетворяющая вышеописанным предположениям, показана на рис. 3.4,с. Для нее справедливы уравнения

$$U_2 = -\mu U_0;$$

$$U_1 = I_1 R_c + U_0;$$

$$U_1 = I_1 (R_c + R_d) + U_2$$

Приводя эти уравнения к виду (3.1), получим значения А-параметров

$$A' = -\frac{R_c(1+\mu)+R_d}{R_d\mu};$$

$$B' = 0;$$

$$C' = \frac{1 + \frac{1}{\mu}}{R_d};$$

$$D' = 0.$$

Для идеального ОУ ($\mu = \infty$) матрица A -параметров преобразуется к виду

$$\|A\| = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{R_d} & 0 \\ -\frac{1}{R_d} & 0 \end{bmatrix}.$$

Для усилителей, схемы замещения которых представляют активные четырехполосники с зависимыми источниками, принцип взаимности не выполняется и

$$A'D' - B'C' \neq 1.$$

При каскадном соединении (рис. 2.1) выполняются условия:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{ВХ}} &= \underline{I}_1', & \underline{I}_2' &= \underline{I}_1'', & \underline{I}_2'' &= \underline{I}_{\text{ВЫХ}}, \\ \underline{U}_{\text{ВХ}} &= \underline{U}_1', & \underline{U}_2' &= \underline{U}_1'', & \underline{U}_2'' &= \underline{U}_{\text{ВЫХ}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Уравнения четырехполосников в матричной форме имеют вид:
для пассивного четырехполосника:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1' \\ \underline{I}_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}' & \underline{B}' \\ \underline{C}' & \underline{D}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2' \\ \underline{I}_2' \end{bmatrix} = \|\underline{A}'\| \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2' \\ \underline{I}_2' \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

для усилителя:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1'' \\ \underline{I}_1'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}' & \underline{B}' \\ \underline{C}' & \underline{D}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2'' \\ \underline{I}_2'' \end{bmatrix} = \|\underline{A}'\| \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2'' \\ \underline{I}_2'' \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

для каскадного соединения:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{\text{ВХ}} \\ \underline{I}_{\text{ВХ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{\text{ВЫХ}} \\ \underline{I}_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix} = \|\underline{A}\| \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{\text{ВЫХ}} \\ \underline{I}_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Учитывая (3.7), получим:

$$\|\underline{A}\| = \|\underline{A}'\| \cdot \|\underline{A}'\|.$$

3.2. Расчет коэффициентов передачи четырехполосников и их каскадного соединения

Передачу сигнала через четырехполосник характеризуют комплексно-частотной характеристикой (КЧХ), равной отношению комплексных изображений отклика и воздействия:

$$K(j\omega) = \frac{\underline{X}_{\text{ВЫХ}}}{\underline{X}_{\text{ВХ}}}.$$

Комплексную передаточную характеристику цепи по напряжению (коэффициент передачи напряжения) представим в показательной форме:

$$K(j\omega) = \frac{\underline{U}_{\text{ВЫХ}}}{\underline{U}_{\text{ВХ}}} = K(\omega) \cdot e^{j\phi(\omega)}.$$

Зависимости модуля $K(\omega)$ и аргумента $\phi(\omega)$ КЧХ называются соответственно амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) цепи.

Для пассивного нагруженного четырехполюсника коэффициент передачи напряжения

$$\underline{K}_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot e^{j\phi_{\Pi}} = \frac{\underline{U}_2'}{\underline{U}_1'}.$$

выражается через его A -параметры и входное сопротивление усилителя $R_{\text{ВХ.А}}$

$$\underline{K}_{\Pi} = \frac{1}{\underline{A}' + \underline{B}' / R_{\text{ВХ.А}}}, \quad (3.11)$$

где

$$R_{\text{ВХ.А}} = \frac{U_1''}{I_1''} = \frac{A'R_{\text{Н}} + B'}{C'R_{\text{Н}} + D'} \quad (3.12)$$

активное сопротивление, не зависящее от частоты.

Входное сопротивление усилителя можно также рассчитать по уравнениям Кирхгофа, записанным для эквивалентной схемы (рис.3.4). Входное сопротивление четырехполюсника, нагруженного на $R_{\text{ВХ.А}}$, имеет вид:

$$\underline{Z}_{\text{ВХ.}} = \frac{\underline{A}'R_{\text{ВХ.А}} + \underline{B}'}{\underline{C}'R_{\text{ВХ.А}} + \underline{D}'} \quad (3.13)$$

Для усилителей

$$K_{\text{А}} = \frac{U_2''}{U_1''} = \frac{1}{A' + B' / R_{\text{Н}}}. \quad (3.14)$$

При каскадном соединении пассивного четырехполюсника и усилителя коэффициент передачи

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}_{\text{ВЫХ}}}{\underline{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{\underline{A} + \underline{B}/R_{\text{H}}} \quad (3.15)$$

или

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}'_2 \cdot \underline{U}''_2}{\underline{U}'_1 \cdot \underline{U}''_1} = \underline{K}_{\text{П}} \cdot K_{\text{А}}. \quad (3.16)$$

При расчете комплексной частотной характеристики коэффициента передачи напряжения и построении АЧХ и ФЧХ в выражение (3.11) следует подставить зависимости A -параметров пассивного четырехполюсника от частоты.

3.3. Анализ цепи в переходном режиме

Как известно, существуют различные аналитические методы расчета переходных процессов в линейных электрических цепях. Наиболее распространенные из них – классический и операторный. Один из этих методов и следует выбрать для анализа цепи в переходном режиме (п. 2.12 задания курсовой работы).

Переходный процесс, возникающий при подключении каскадного соединения пассивного четырехполюсника и усилителя к синусоидальному источнику э.д.с. $e(t)$ с частотой $f=50$ Гц, рассчитывается по схеме, представленной на рис. 3.5. В индивидуальном задании дается максимальное значение входной э.д.с. - E_m .

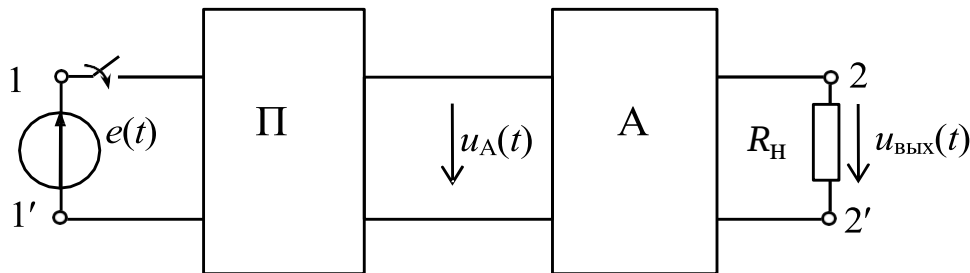


Рис. 3.5

После коммутации получается двухконтурная цепь второго порядка с нулевыми независимыми начальными условиями для напряжений на емкостях. Поскольку коэффициент передачи усилителя $K_{\text{А}}$ не зависит от частоты, необходимо заменить усилитель с нагрузкой R_{H} входным сопротивлением усилителя $R_{\text{ВХ.А}}$. При

определении входного напряжения усилителя с нагрузкой $u_A(t)$ классическим методом

$$u_A(t) = u_{A\text{пр.}}(t) + u_{A\text{св.}}(t), \quad (3.17)$$

где $u_{A\text{пр.}}(t)$ -принужденная составляющая, $u_{A\text{св.}}(t)$ -свободная составляющая напряжения.

Принужденную составляющую напряжения $u_{A\text{пр.}}(t)$ можно рассчитать с помощью коэффициента передачи $K_{\Pi}(j\omega)$ (см. п. 1.2.9).

Расчет $u_{A\text{пр.}}(t)$ провести в комплексной форме

$$\underline{U}_{\text{пр.м}} = \underline{K}_{\Pi} \underline{E}_m = K_{\Pi} e^{j\phi_{\Pi}} E_m e^{j\phi_E} = U_{Am} e^{j\psi_U}, \quad (3.18)$$

после чего перейти к мгновенному значению

$$u_{A\text{пр.}}(t) = U_{Am} \sin(\omega t + \psi_u). \quad (3.19)$$

Свободная составляющая $u_{A\text{св.}}(t)$ определяется классическим или операторным методом (по заданию преподавателя). При классическом методе расчета свободная составляющая определяется в виде

$$u_{A\text{св.}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (3.20)$$

где p_1, p_2 – корни характеристического уравнения;

A_1, A_2 – постоянные интегрирования.

Величины A_1, A_2 находятся из зависимых начальных условий

$u_{A\text{св.}}(0), \frac{du_{A\text{св.}}}{dt} \Big|_{t=0}$. Для их определения необходимо составить

систему дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационной цепи с учетом законов коммутации.

При расчете $u_{A\text{св.}}(t)$ операторным методом составляется операторная схема замещения цепи для свободных составляющих в послекоммутационном режиме. По этой схеме определяется изображение свободной составляющей напряжения методом контурных токов или узловых потенциалов. Применяя теорему разложения, получают $u_{A\text{св.}}(t)$.

Напряжение на сопротивлении нагрузки R_H определяется через коэффициент передачи усилителя

$$u_{\text{вых}}(t) = K_A \cdot u_{A \text{ пр.}}(t) + K_A \cdot u_{A \text{ св.}}(t). \quad (3.21)$$

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

4.1. Составление расчетной схемы

Топология схемы и цифровые данные выдаются каждому студенту в виде распечатки:

ZAD6-806468-12
$Y_1; Y_2; Z_3;$
$f=50 \text{ Гц}$
$R_0=6 \text{ кОм}$
$R_1=\infty \text{ кОм}$
$C_1=0.0 \text{ мкФ}$
$R_2=10 \text{ кОм}$
$C_2=0.8 \text{ мкФ}$
$R_3=13.50 \text{ кОм}$
$C_3=0.1 \text{ мкФ}$
$R_H=3.20 \text{ кОм}$
$E=350 \text{ мВ}; \psi_E=80 \text{ град}$
УСИЛИТЕЛЬ В

В первой строке задан шифр работы. Вторая строка указывает тип соединения элементов R и C пассивного двухполюсника (Z – последовательное, Y – параллельное). Если активное сопротивление R равно нулю, то ветвь закорачивается; при $R = \infty$ ветвь разрывается; для C – наоборот. Схема, соответствующая приведенной выше распечатке, показана на рис. 4.1.

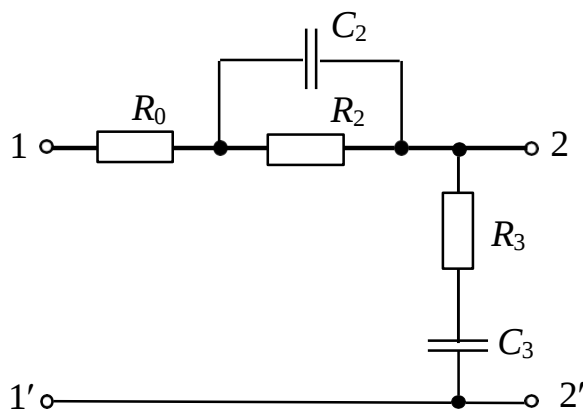


Рис. 4.1

4.2. Пример расчета переходного процесса классическим методом

Для схемы (рис. 4.2) определим напряжение $u_A(t)$ классическим методом.

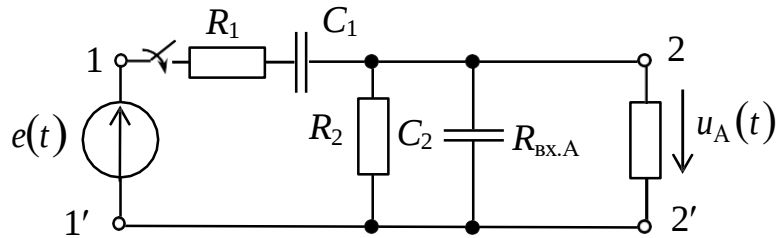


Рис. 4.2

Для данной схемы независимые начальные условия – нулевые:

$$\begin{aligned} u_{C_1}(0+) &= u_{C_1}(0-) = u_{C_1}(0) = 0; \\ u_{C_2}(0+) &= u_{C_2}(0-) = u_{C_2}(0) = 0. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Методом входного сопротивления определим корни характеристического уравнения из уравнения $Z(p) = 0$ для схемы (рис. 4.3).

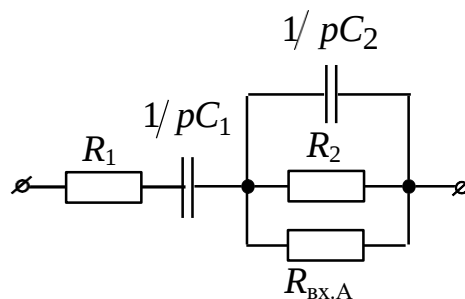


Рис. 4.3

Тогда

$$\begin{cases} u_A(t) = U_{Am} \sin(\omega t + \psi_u) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \\ \frac{du_A(t)}{dt} = \omega U_{Am} \cos(\omega t + \psi_u) + p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}. \end{cases} \quad (4.3)$$

Для определения зависимых начальных условий $u_A(0)$ и

$\frac{du_A}{dt}\bigg|_{t=0}$ рассмотрим схему (рис. 4.2) в момент коммутации ($t=0$), которая преобразуется в схему (рис. 4.4).

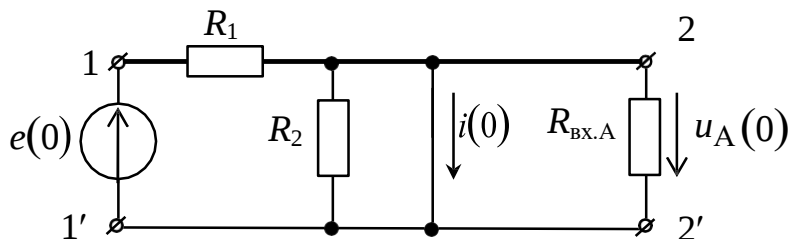


Рис. 4.4

Очевидно, что

$$u_A(0) = 0, \quad i(0) = \frac{e(0)}{R_1}, \quad \frac{du_A}{dt}\bigg|_{t=0} = \frac{i(0)}{C_2}.$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяются из системы уравнений

$$u_A(0) = U_{Am} \sin(\psi_u) + A_1 + A_2, \quad (4.4)$$

$$\frac{du_A}{dt}\bigg|_{t=0} = \frac{e(0)}{R_1 C_2} = \omega U_{Am} \cos(\psi_u) + p_1 A_1 + p_2 A_2. \quad (4.5)$$

4.3. Пример расчета свободной составляющей напряжения операторным методом

Составим операторную схему замещения для свободных составляющих в послекоммутационном режиме (рис. 4.5).

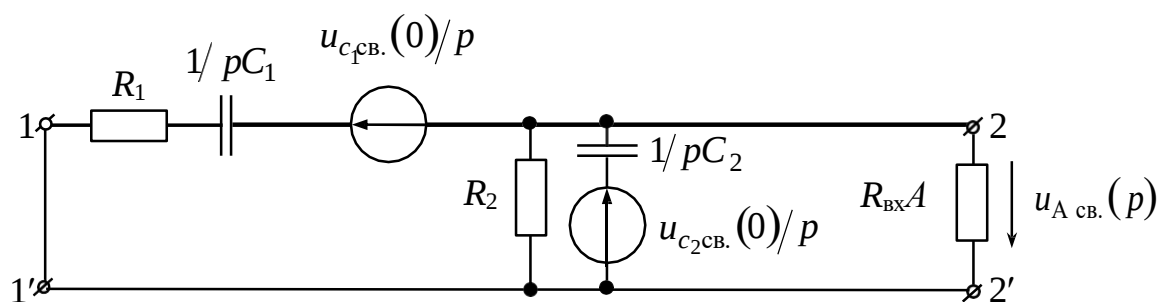


Рис. 4.5

Начальные условия для свободных составляющих:

$$u_{C_{CB}}(0) = u_{C_1}(0) - u_{C_{пр.}}(0) = -u_{C_{пр.}}(0);$$

$$u_{C_{\text{св}}}(0) = u_{C_2}(0) - u_{C_{2\text{пр}}}(0) = -u_{C_{2\text{пр}}}(0) \quad (4.6)$$

Расчет принужденного режима проводим по схеме (рис. 4.2) в комплексной форме. Напряжение на входе усилителя $u_{1\text{св}}(p)$ определим методом узловых потенциалов

$$U_{\text{А св}}(p) = \phi_2(p) - \phi_2'(p) = \phi_2(p) \quad \text{так как } \phi_2'(p) = 0.$$

Получим:

$$U_{\text{А св.}}(p) = \phi_2(p) = \frac{-\frac{u_{C_{1\text{св}}}(0)}{p\left(R_1 + \frac{1}{pC_1}\right)} + \frac{u_{C_{2\text{св}}}(0)}{p} \cdot pC_2}{\frac{1}{R_1 + \frac{1}{pC_1}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{\text{вхА}}} + pC_2} = \frac{G(p)}{H(p)}, \quad (4.7)$$

где $G(p), H(p)$ – полиномы числителя и знаменателя соответственно.

Применяя теорему разложения, находим

$$u_{\text{А св.}}(t) = \frac{G(p_1)}{H'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{G(p_2)}{H'(p_2)} e^{p_2 t}, \quad (4.8)$$

где p_1, p_2 – полюсы изображения, определяемые из уравнения $H(p)=0$ (корни характеристического уравнения $Z(p)=0$, полученные при расчете классическим методом).

Следует отметить, что переходный процесс для RC -цепей первого и второго порядка может быть только аperiodическим.

При построении графика $u_{\text{вых}}(t)$ после коммутации необходимо показать принужденную и свободную составляющие. Если принужденную и свободную составляющие в одном масштабе построить затруднительно, то их строят в разных масштабах на отдельных графиках, где указывают период сигнала на выходе цепи и время переходного процесса. Время переходного процесса принять

равным $(3-5)\tau$, где $\tau = \frac{1}{\|p_{\min}\|}$. Кроме того, следует в масштабе

показать расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНОГО ПАКЕТА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее полной проверкой расчета электрической цепи, содержащей пассивный четырехполюсник и управляемый источник, является построение частотных характеристик по передаточной функции $K(\omega)$ и $\phi(\omega)$ (амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики).

На рис. 5.1 представлен пассивный четырехполюсник со следующими параметрами: $R_1=0,2$ кОм; $R_2=1$ кОм; $R_3=3$ кОм; $R_4=3$ кОм; $C_2=0,1$ мкФ; $C_3=0,4$ мкФ. Действующее значение входного напряжения 1 В.

Для пассивного нагруженного четырехполюсника модуль коэффициента передачи по напряжению

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\text{н}}}{U_1} = \frac{722,9 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,7229.$$

На рис. 5.2 представлены амплитудно-частотная и фазо- частотная характеристики данного четырехполюсника, полученные с применением стандартного пакета схемотехнического моделирования ELECTRONICS WORKBENCH 5.12 (EWB 5.12).

На рис. 5.3 представлена схема операционного усилителя ОУ со следующими параметрами $R_c= 3$ кОм; $R_d= 1300$ кОм. На вход подано напряжение, действующее значение которого $U_1=1$ мВ.

Коэффициент усиления данного операционного усилителя

$$K_A = \frac{433,2 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 433,2,$$

что соответствует

$$K_A = \frac{R_d}{R_c} = \frac{1300}{3} = 433,2.$$

На рис. 5.4 представлено каскадное соединение пассивного четырехполюсника с операционным усилителем с коэффициентом усиления

$$K = K_{\Pi} \cdot K_A = 0,7229 \cdot 433,2 = 313,1,$$

что соответствует

$$K = \frac{U_H}{U_1} = \frac{313,1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 313,1,$$

полученному по показаниям вольтметров на схеме (рис. 3.4).

На рис. 5.5 представлены частотные характеристики данной схемы.

Сравним полученные частотные характеристики (рис. 5.2 и рис.

5.5) например на частоте 1000 Гц.

Напряжение на выходе увеличилось в 433,2 раза, а фаза изменилась на 180 °.

При расчете переходного процесса с применением программы EWB 5.12 составляется схема (рис. 5.6).
Снимаем динамическую характеристику (зависимость $u_{\text{вых}}(t) = u_{20}(t)$).

На входе напряжение $u_1(t) = 50 \sqrt{2} \sin(\omega t + 20^\circ)$, мВ.

Момент коммутации взят $t = 1$ мс (а не $t = 0$) исходя из особенности программы EWB 5.12.

На рис. 3.7,а представлена зависимость для выходного напряжения при $t < 2$ мс, а на рисунке 3.7,б та же зависимость для $t > 20$ мс.

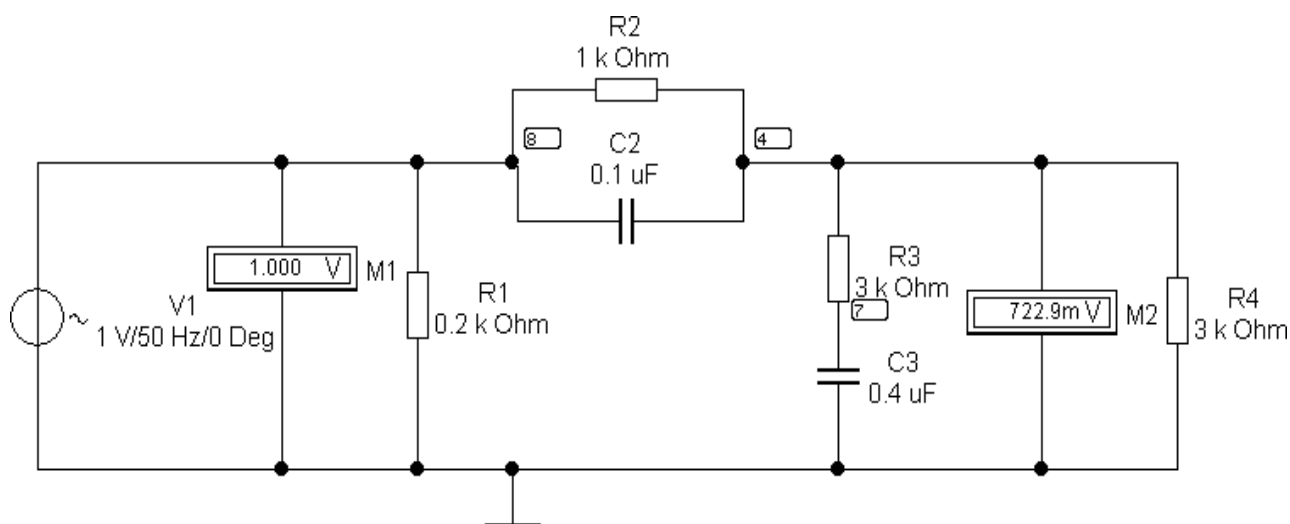


Рис. 5.1 Π – образный пассивный четырехполюсник

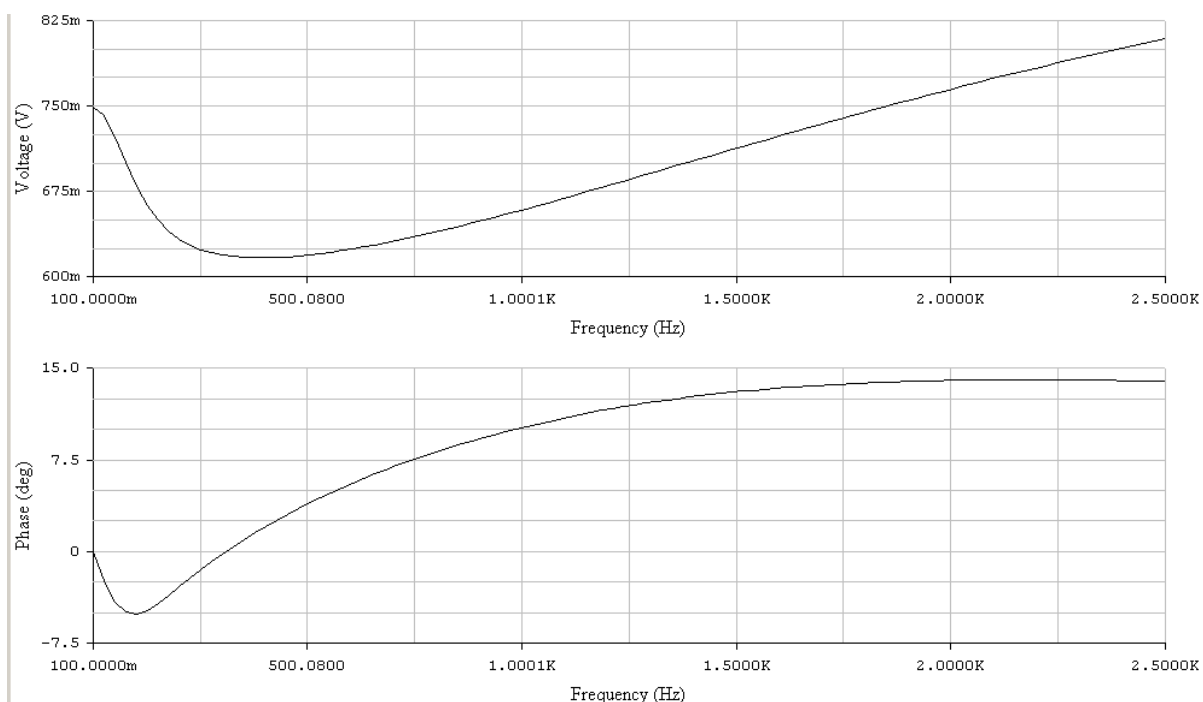


Рис. 5.2 Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики (АЧХ и ФЧХ) пассивного четырехполюсника

С помощью приборов, имеющихся в пакете EWB 5.12, исследуйте частотные и временные характеристики заданной цепи. Полученные зависимости сравните с расчетными. Сделайте выводы.

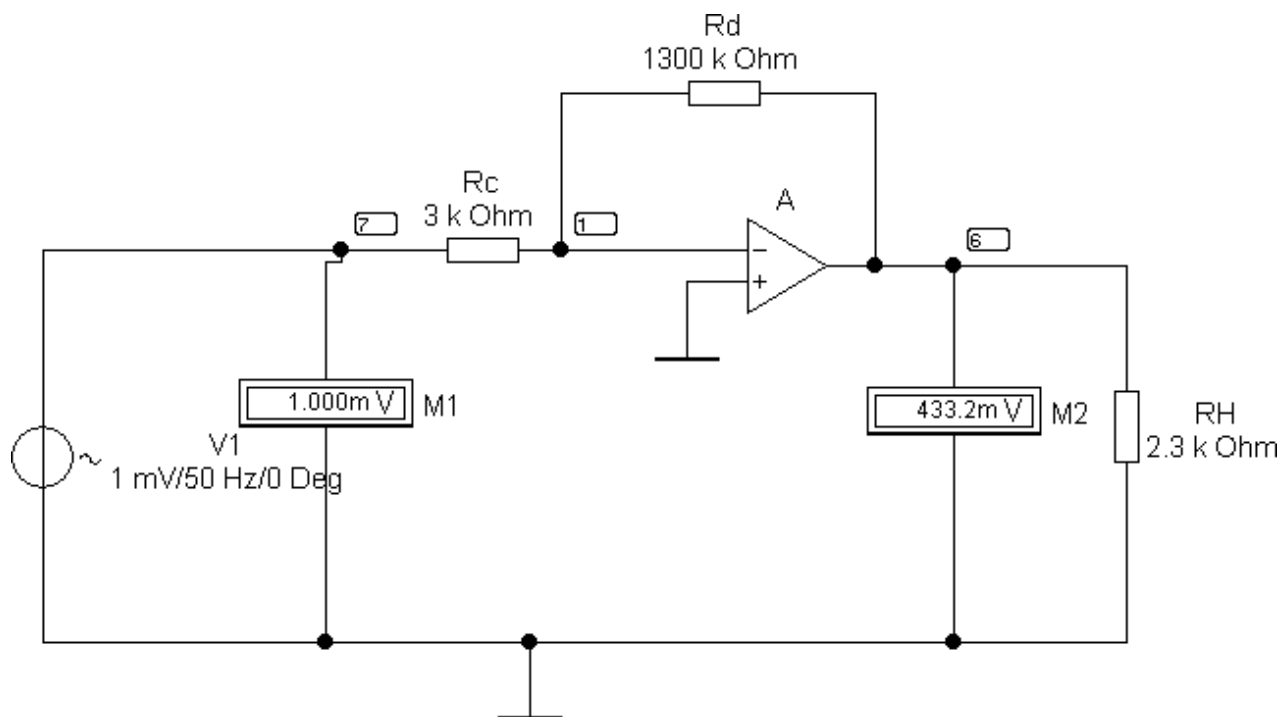


Рис. 5.3 Активный четырехполюсник (усилитель C)

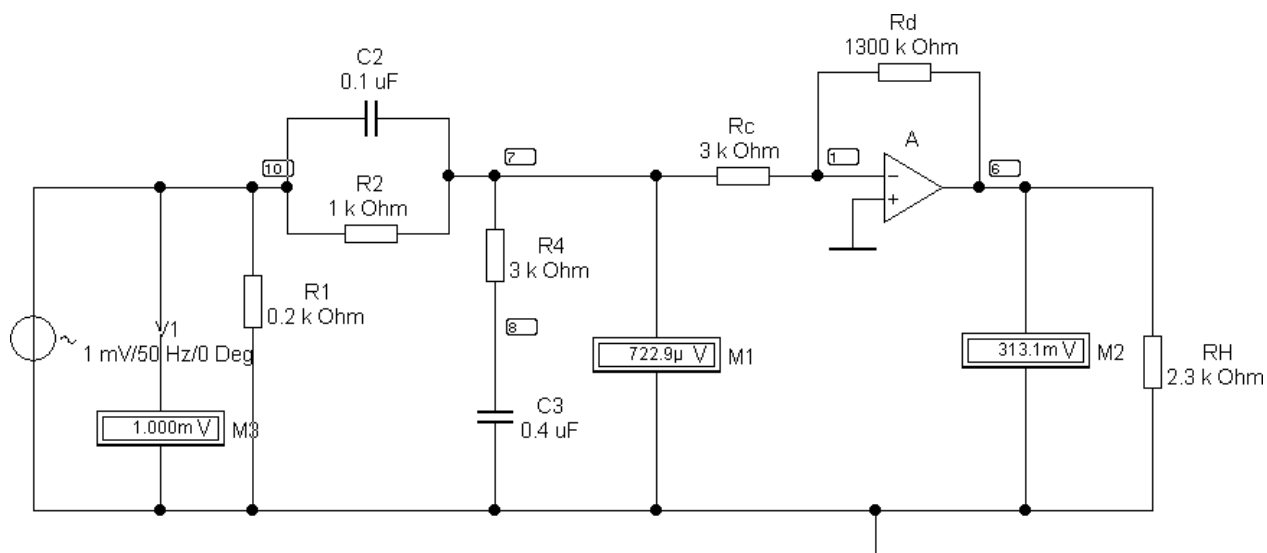


Рис. 5.4 Каскадное соединение пассивного четырехполюсника с операционным усилителем

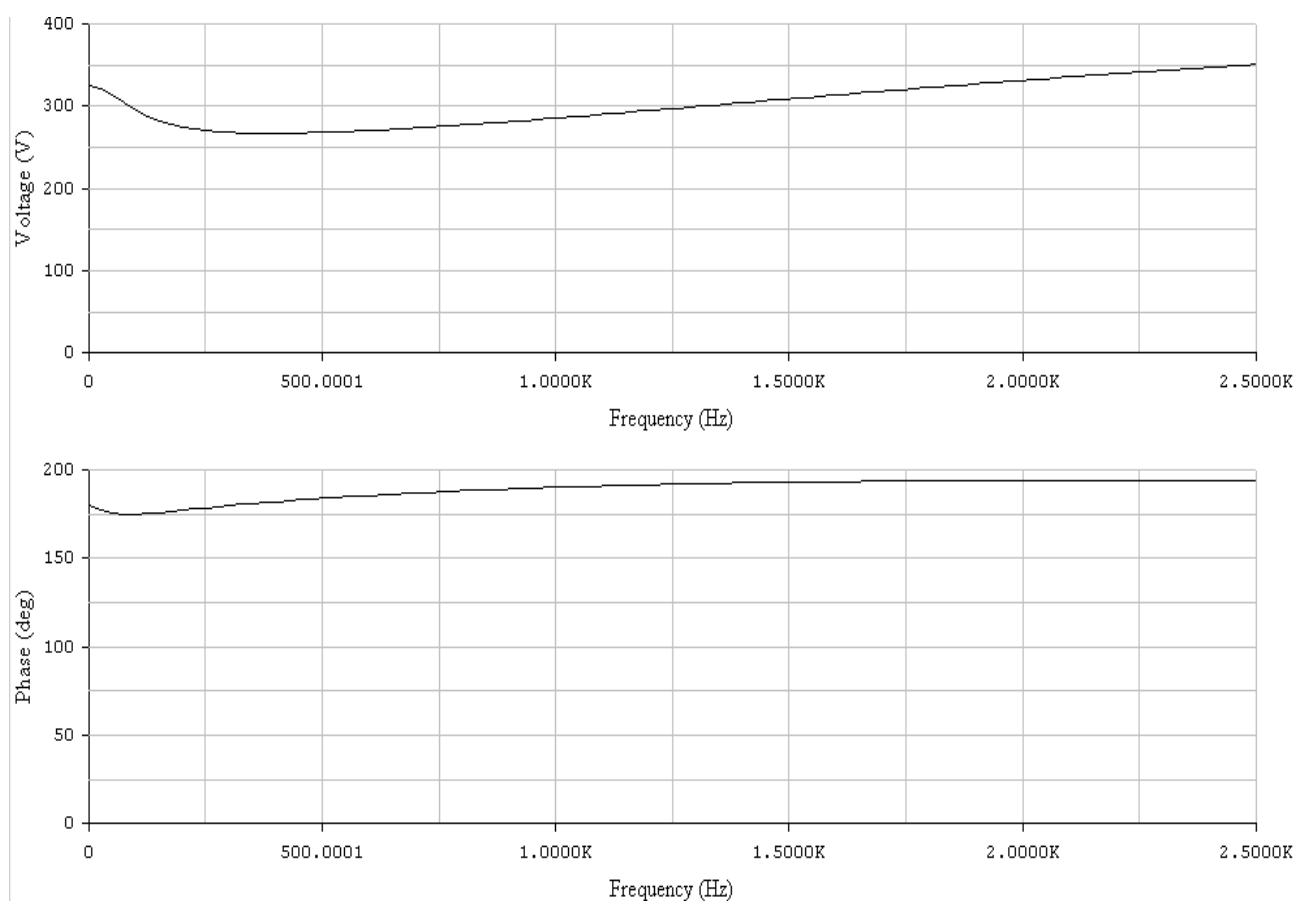


Рис. 5.5 Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики (АЧХ и ФЧХ) каскадного соединения активного и пассивного четырехполюсника

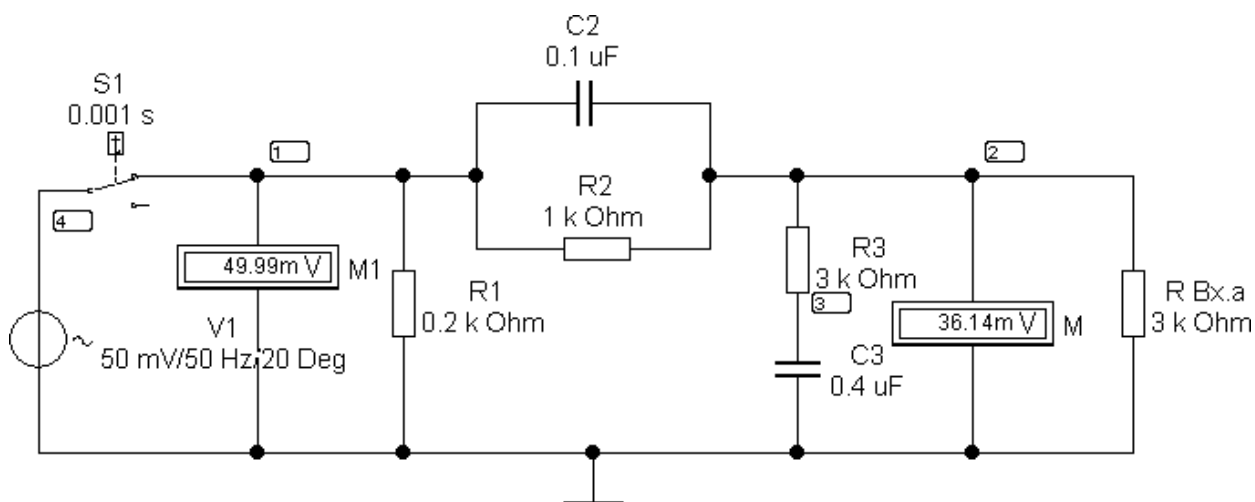
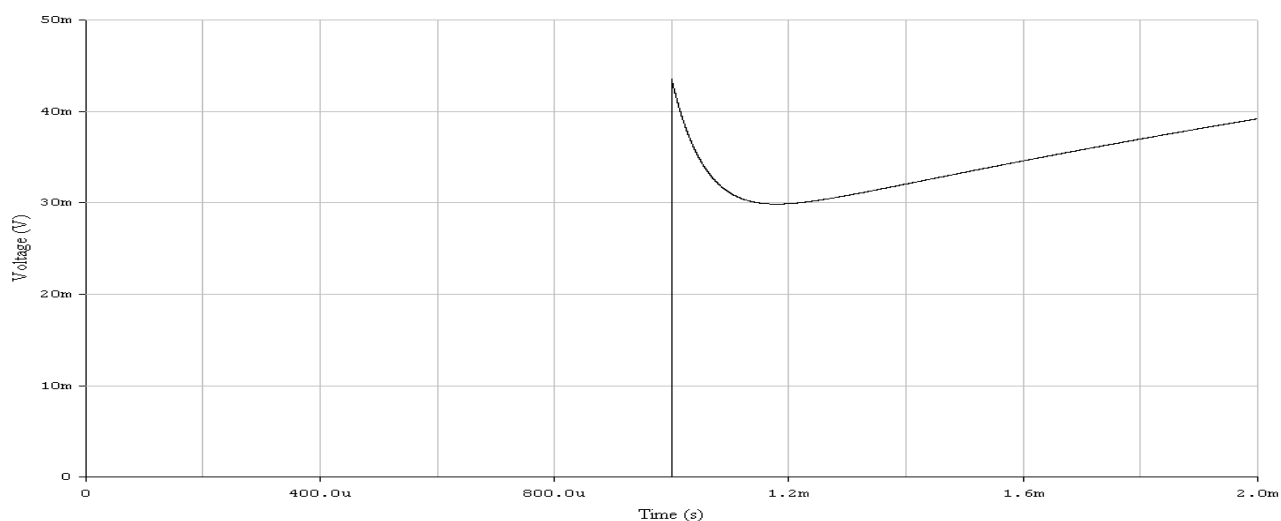
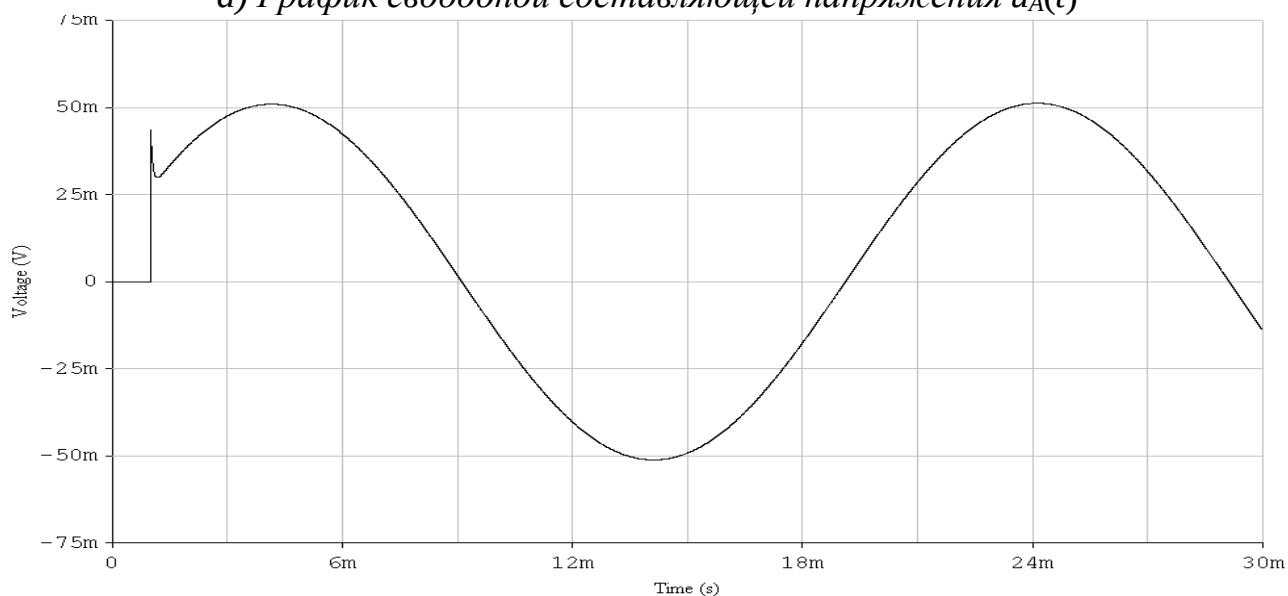


Рис. 5.6 Анализ переходного процесса



а) График свободной составляющей напряжения $u_A(t)$



б) График напряжения $u_A(t)$

Рис. 5.7

6. ИСЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В ИНЖЕНЕРНОМ МАТИМАТИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ MATHCAD

Дано

$$n := 8 \quad \omega := 314 \quad \psi_e := 80 \quad e := 350000 \quad R_H := 3.20 \cdot 10^3 \quad f := 50$$

$$h_{11} := 10^3 \quad h_{12} := 10^{-4} \quad h_{21} := 5 \cdot (n + 10) \quad h_{22} := 10^{-4}$$

$$R_a := n \cdot 10^3 \quad R_b := 100 \cdot n \quad R_c := n \cdot 10^3 \quad R_d := [(n + 10) \cdot 10^2] \cdot 10^3$$

$$R_0 := 6 \cdot 10^3 \quad R_1 := \infty \quad R_2 := 10 \cdot 10^3 \quad R_3 := 13.5 \cdot 10^3 \quad E_m := 8$$

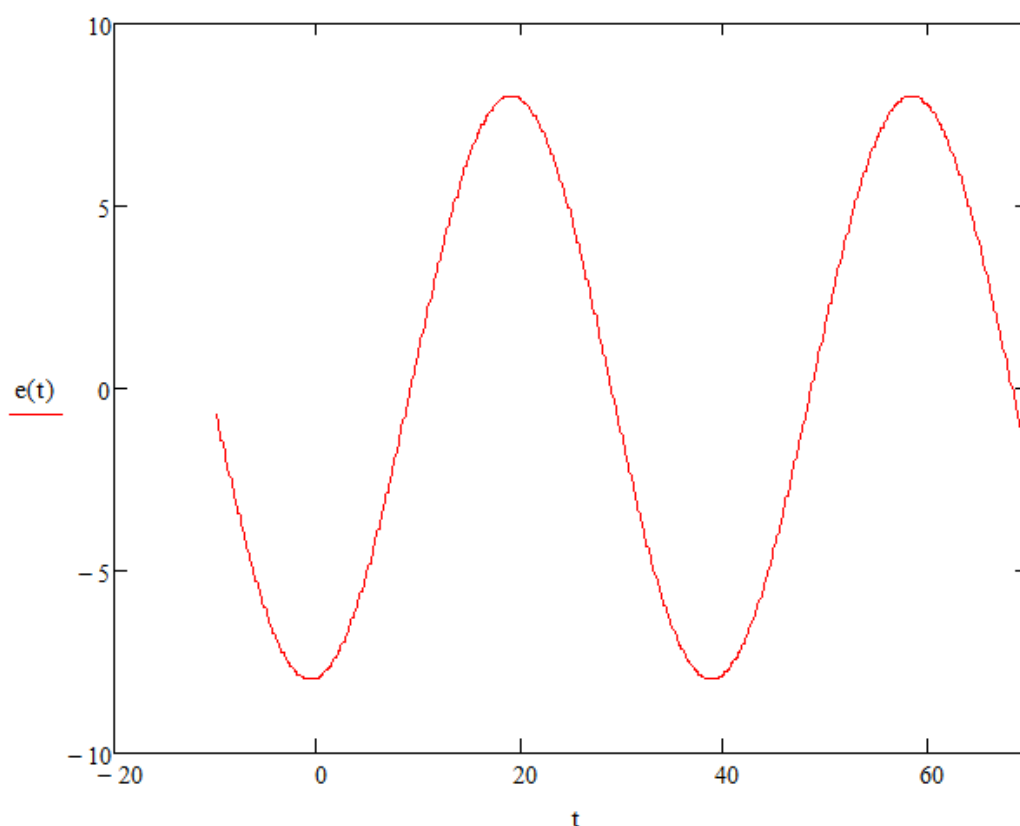
$$Y_1 := 8 \quad Y_2 := 8 \quad C_1 := 0 \quad C_2 := 0.8 \cdot 10^{-3} \quad C_3 := 0.1 \cdot 10^{-3}$$

$$K > \frac{K_{\max}}{\sqrt{2}} \quad K_p(j\omega) := K_p(\omega) \cdot e^{i \cdot \varphi_p \cdot \omega}$$

$$K(j\omega) = K_p(j\omega) \cdot K_a \quad K(j\omega) := K(\omega) \cdot e^{i \cdot \varphi(\omega)}$$

$$U_{\text{прп}} = K_{\text{п}} \cdot E_m = K_{\text{п}} \cdot e^{i \cdot \varphi_{\text{п}}} \cdot E_m \cdot e^{i \cdot \varphi_e} = U_{\text{ам}} \cdot e^{i \cdot \psi \cdot U}$$

$$e(t) := E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_e)$$



Определение параметров пассивного четырехполюсника и усилителя

Для П схемы

$$A_{\Pi} := 1 \cdot Z_2 \cdot Y_3 = 64 \quad B_{\Pi} := Z_2 = 8 \quad C_{\Pi} := Y_1 + Y_3 + Z_2 \cdot Y_1 \cdot Y_3 = 528 \quad D_{\Pi} := 1 + Z_2 \cdot Y_1 = 65$$

$$U_{1\Pi} := A_{\Pi} \cdot U_2 + B_{\Pi} \cdot I_2 = 576 \quad I_{1\Pi} := C_{\Pi} \cdot U_2 + D_{\Pi} \cdot I_2 = 4.744 \times 10^3$$

Для Т схемы

$$C_T := Y_3 = 8 \quad D_T := 1 + Z_2 \cdot Y_3 = 65$$

$$A_T := 1 + Z_1 \cdot Y_3 = 65 \quad B_T := Z_1 + Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot Y_3 = 528$$

$$U_{1T} := A_T \cdot U_2 + B_T \cdot I_2 = 4.744 \times 10^3 \quad I_{1T} := C_T \cdot U_2 + D_T \cdot I_2 = 584$$

Для Г схемы

$$A_G := 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 2 \quad B_G := Z_1 = 8 \quad C_G := \frac{1}{Z_2} = 0.125 \quad D_G := 1$$

$$U_{1r} := A_r \cdot U_2 + B_r \cdot I_2$$

$$I_{1r} := C_r \cdot U_2 + D_r \cdot I_2$$

$$U_{1r} = 80$$

$$I_{1r} = 9$$

$$U_1 := h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 := h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2$$

$$U_1 = 8 \times 10^3$$

$$I_2 = 720.001$$

$$U_{\text{вых}} := \mu \cdot (U_y - U_{y11}) = 0$$

$$U_2 := -\mu \cdot U_0 = -40$$

$$U_1 := I_1 \cdot R_c + U_0 = 6.401 \times 10^4$$

$$U_1 := I_1 \cdot (R_c + R_d) + U_2$$

Расчет А параметра

$$B_a := 0 \quad D_a := 0$$

$$A_a := \frac{R_c \cdot (1 + \mu) + R_d}{R_d \cdot \mu} \quad C_a := \frac{1 + \frac{1}{\mu}}{R_d}$$

$$A := \begin{pmatrix} \frac{-R_c}{R_d} & 0 \\ \frac{-1}{R_d} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.444 \times 10^{-3} & 0 \\ -5.556 \times 10^{-7} & 0 \end{pmatrix}$$

Расчет коэффициентов передачи четырехполюсников и их каскадного соединения

$$\underline{\underline{K(j\omega)}} := \frac{X_{\text{ВЫХ}}}{X_{\text{ВХ}}}$$

$$K_{\Pi} := \frac{U_2}{U_1}$$

$$K_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot e^{i \cdot \varphi_{\Pi}}$$

$$K(j\omega) = K(\omega) \cdot e^{i \cdot \varphi \cdot (\omega)}$$

$$R_{\text{ВХА}} := \frac{U_1 - A_a \cdot R_H + B_a}{I_1 - C_a \cdot R_H + D_a} \quad K_a := \frac{U_2}{U_1} \quad K_a = \frac{1}{A_a + \frac{B_a}{R_H}}$$

$$R_{\text{ВХА}} = 1.808 \times 10^6$$

$$K_a = -2.765 \times 10^{-6}$$

$$Z_{\text{ВХ}} := \frac{(A_a \cdot R_{\text{ВХА}} + B_a)}{C_a \cdot R_{\text{ВХА}} + D_a}$$

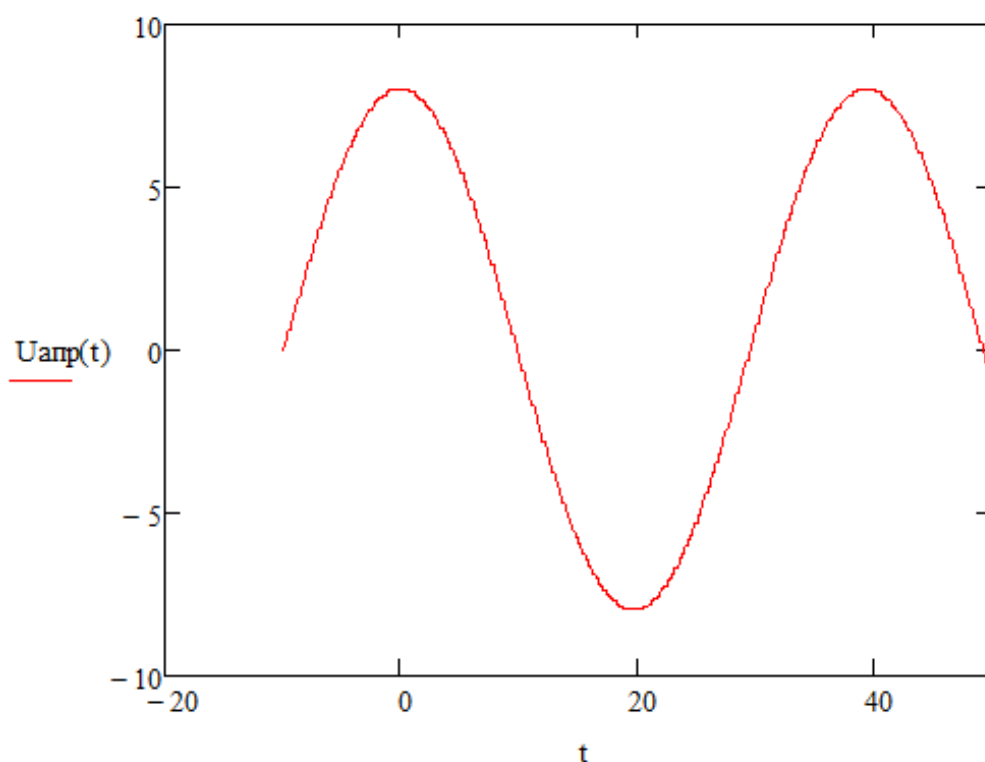
$$\underline{\underline{K}} := \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

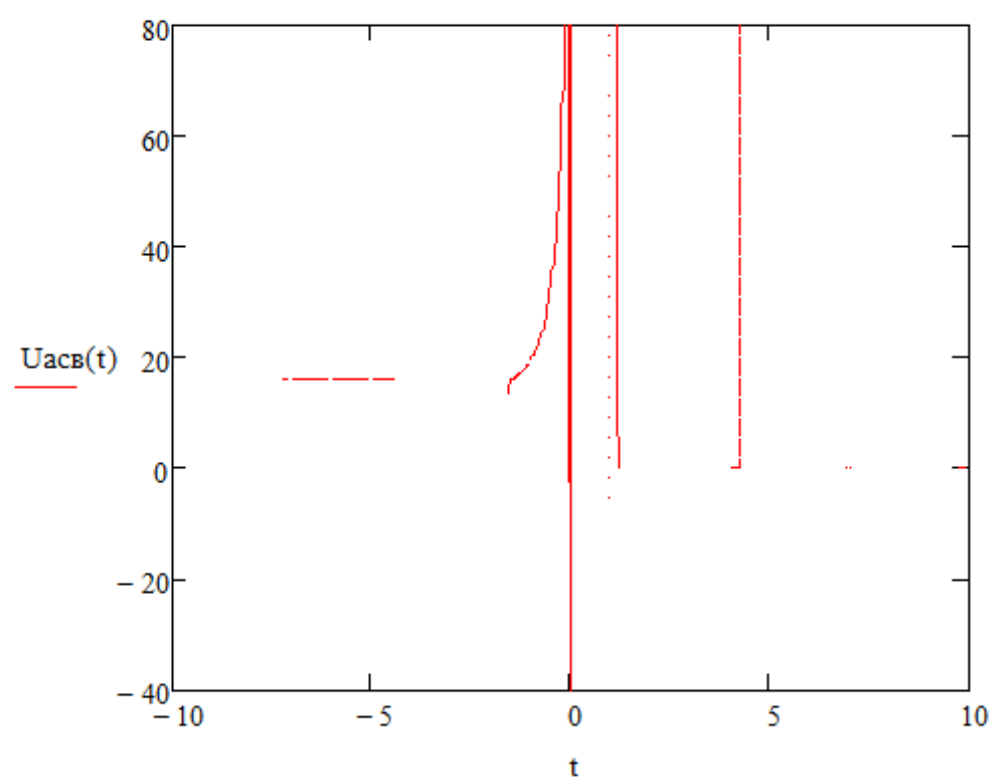
$$Z_{\text{ВХ}} = 2.08 \times 10^5$$

Анализ цепи в переходном режиме

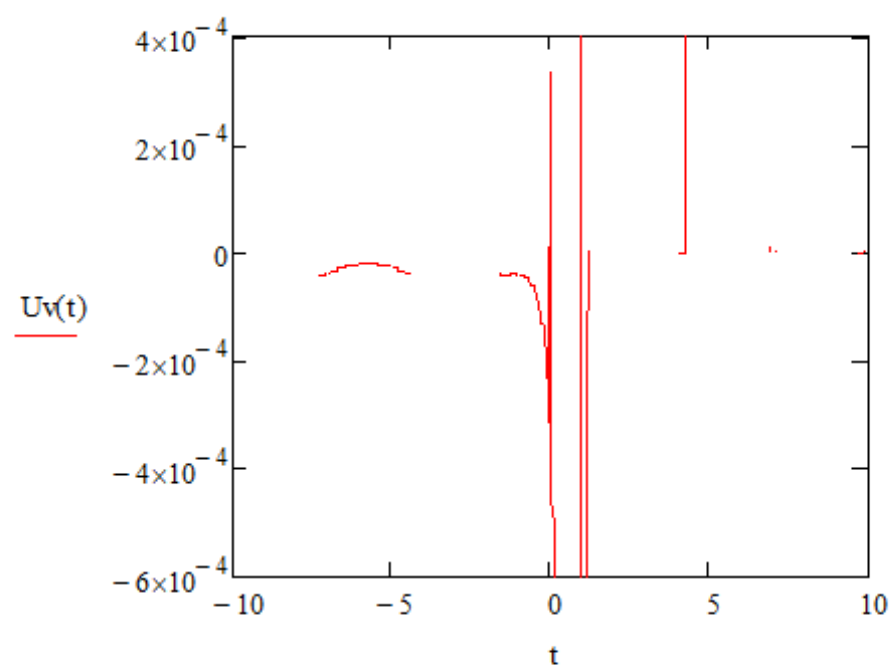
$$U_{\text{amp}}(t) := U_{\text{am}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi \cdot u)$$

$$U_{\text{асв}}(t) := A_1 \cdot e(t)^{p_1 t} + A_2 \cdot e(t)^{p_2 t}$$





$$U_{\forall}(t) := K_a \cdot U_{amp}(t) + K_a \cdot U_{acв}(t)$$



7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНОГО ПАКЕТА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее полной проверкой расчета электрической цепи, содержащей пассивный четырехполюсник и управляемый источник, является построение частотных характеристик по передаточной функции $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ (амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики) [3].

Схема П – образного пассивного четырехполюсника приведена на рисунке 5.1. На рисунке 5.2 приведены ее амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

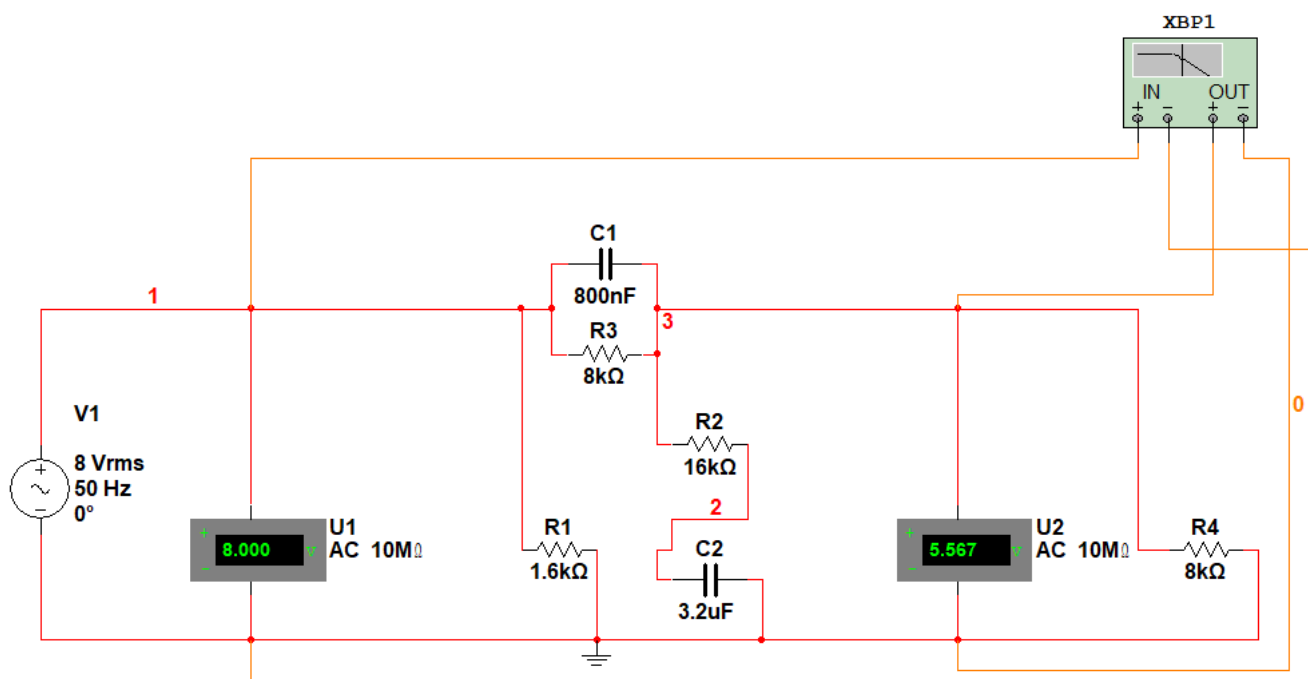


Рис. 5.1 П – образный пассивный четырехполюсник

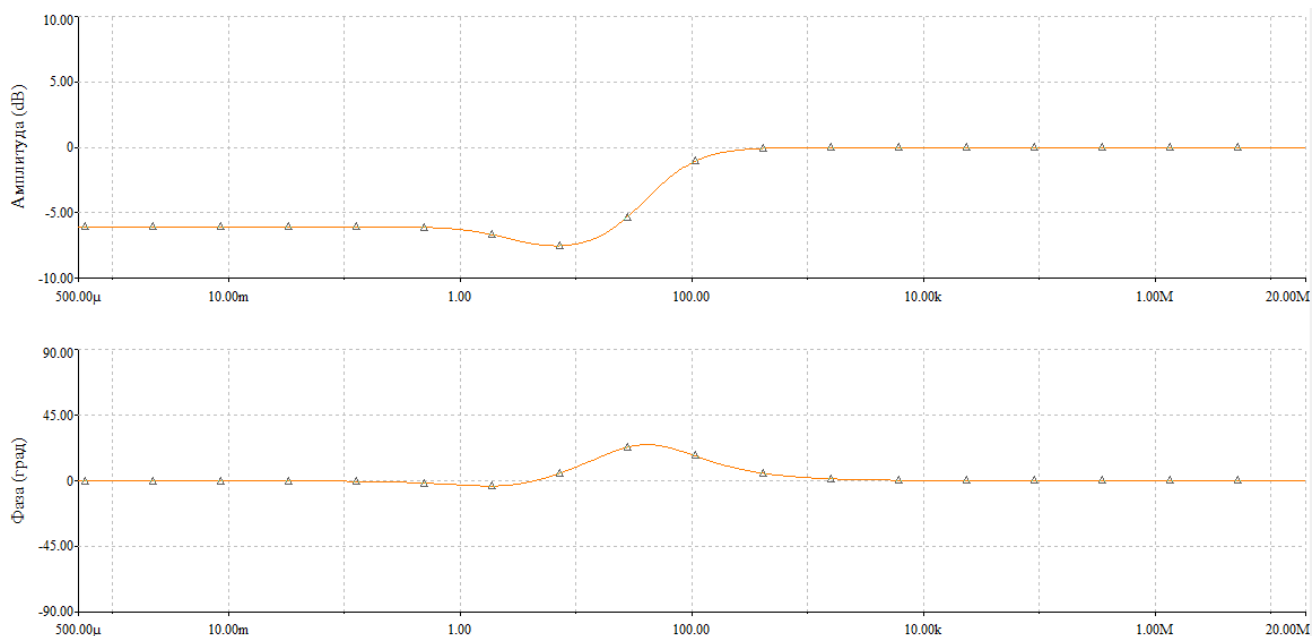


Рис. 5.2 Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики (АЧХ и ФЧХ) пассивного четырехполюсника

Схема активного четырехполюсника (усилитель С) приведена на рисунке 5.3. На рисунке 5.4 приведены ее амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

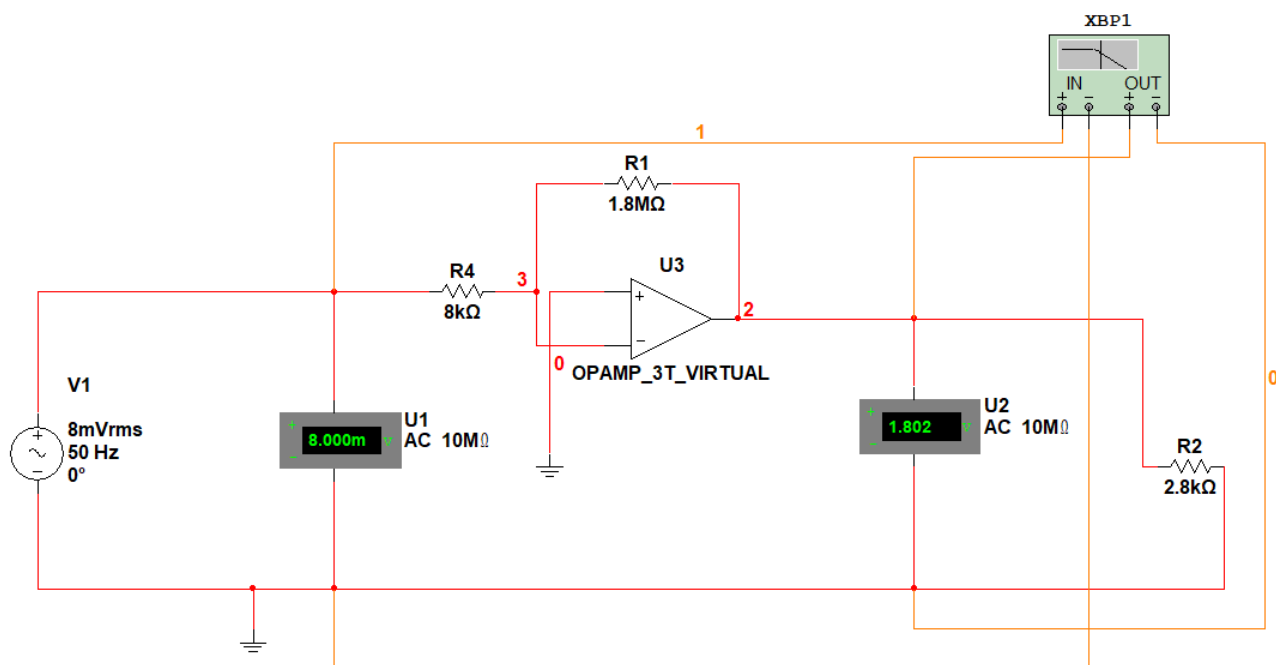


Рисунок 5.3 - Схема активного четырехполюсника

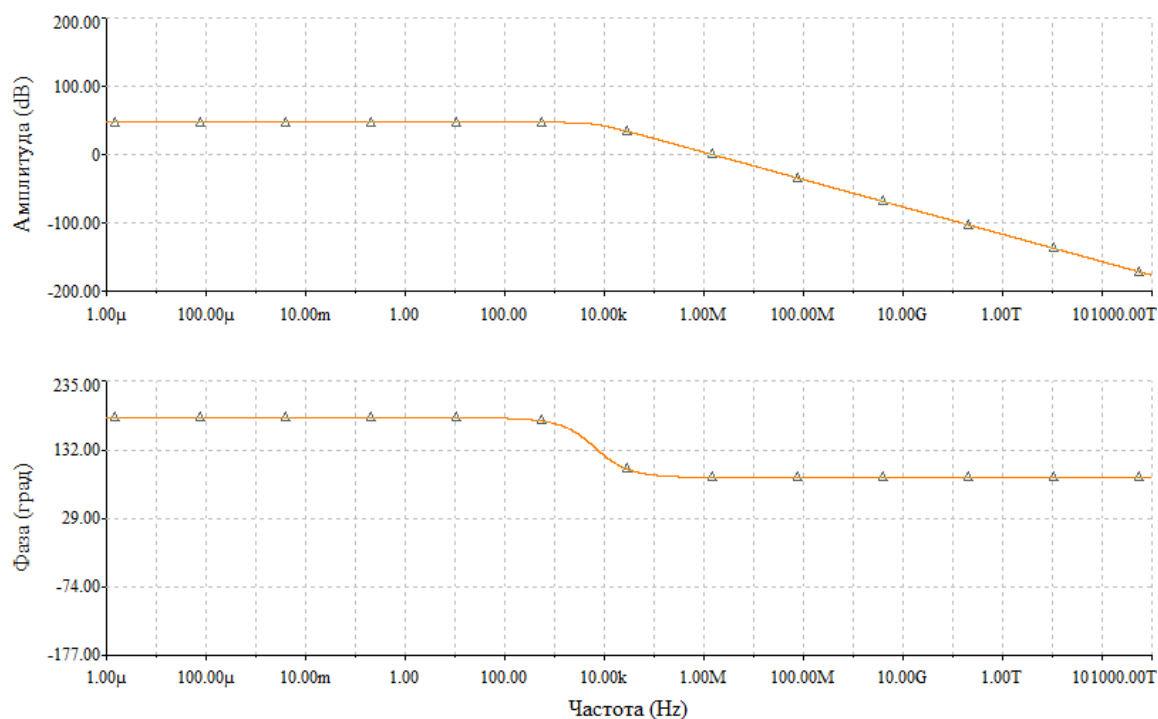


Рисунок 5.4 - Характеристики активного четырехполюсника

Схема каскадного соединения пассивного четырехполюсника с операционным усилителем приведена на рисунке 5.5. На рисунке 5.6 приведены ее амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

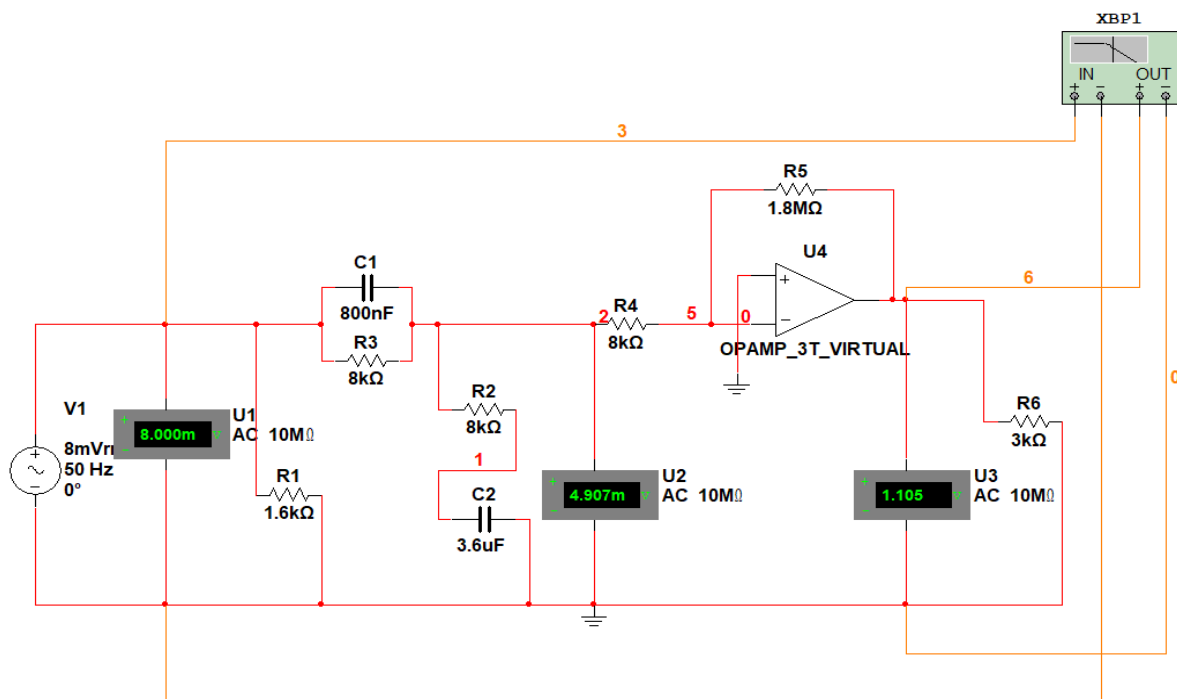


Рисунок 5.5 - Схема каскадного соединения пассивного четырехполюсника с операционным усилителем

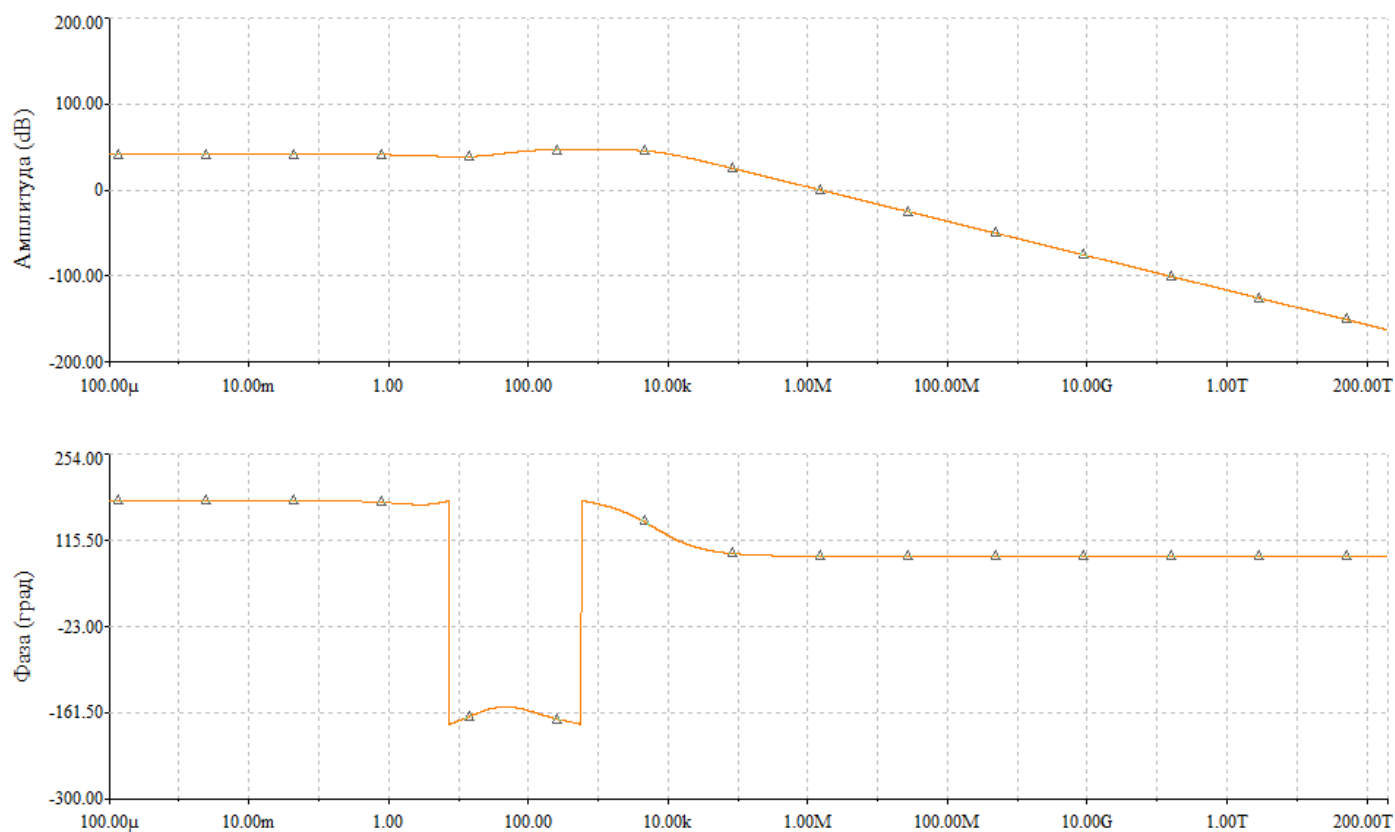


Рисунок 5.6 - Характеристики каскадного соединения пассивного четырехполюсника с операционным усилителем

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 831 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-10731-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/456410> (дата обращения: 29.10.2020). Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. — 4-е изд., доп. для самост. изучения курса. — СПб.: Питер. —Т.1.-2003. —463 с.
2. Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. —4-е изд., доп. для самост. изучения курса. — СПб.: Питер.—Т.2. —2003. —576 с.
3. Методы расчета электрических цепей, содержащих четырехполюсники и управляемые элементы: Методические указания к курсовой работе по теории электрических цепей /УГАТУ. Сост.: Т.И. Гусейнова, Л.С. Медведева — Уфа, 2007, 28 с.

Приложение 1

Заведующему кафедрой транспортно-
энергетических систем Чебоксарского
института (филиала) Московского
политехнического университета

студента _____
группа _____
тел. _____

заявление.

Прошу закрепить за мной тему курсовой работы

« _____ »
_____»

по дисциплине

« _____ ».

и назначить руководителем

Студент _____ / _____ / _____
(подпись) (ФИО студента) (дата)

Руководитель _____ / _____ / _____
(подпись) (ФИО студента) (дата)

Заведующий кафедрой _____ / _____ / _____

(подпись) (ФИО зав. кафедрой) (дата)

Кафедра транспортно-энергетические системы

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Спецразделы ТОЭ»

Наименование темы

Рег.номер _____

Выполнил :
студент . курса, группы _____
_____ формы обучения
по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»

Ф.И.О.

Допущена к защите
«____» _____ 202__г.

Научный руководитель:

должность, звание

подпись

Ф.И.О.

Защита курсовой работы:

Оценка _____

Дата «____» _____ 202__г.

Подпись научного руководителя

Чебоксары 202____г.

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ на курсовую работу

Студент _____

Кафедра транспортно-энергетические системы

Направление подготовки (специальность) и профиль (специализация) _____

Наименование темы: _____

Руководитель: _____
должность, звание, Ф.И.О.

1. Актуальность темы курсовой работы

2. Соответствие полученных результатов заявленным целям и задачам

3. Характеристика использования в работе исследовательского инструментария (анализа, синтеза, статистико-математической методологии, пакетов прикладных программ и т.п.)

4. Степень самостоятельности при работе над курсовой работой (самостоятельность изложения и обобщения материала, самостоятельная интерпретация полученных результатов, обоснованность выводов)

5. Оценка оформления проекта в соответствии с требованиями, содержащимися в Методических указаниях по выполнению курсовой работы, разработанных и утвержденных кафедрой

6. Замечания по подготовке и выполнению курсовой работы

7. Курсовая работа соответствует предъявляемым требованиям и может быть рекомендована к защите

8. Оценка _____

« ____ » _____ 202__ г.

(подпись руководителя) / _____
расшифровка подписи