



Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации
Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»
Волго-Вятский филиал

Кафедра инфокоммуникационных и профессиональных дисциплин

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
по учебной дисциплине
«Теория электрических цепей»

Исследование частотных характеристик
линейных электрических цепей

Продолжительность 2 часа

г. Нижний Новгород
2021 г.

Составитель: М.Г. Тылес

Обсуждено на заседании кафедры

«__» _____ 2019 г.

Протокол № _____

Литература:

1. Бычков Ю.А. Основы теории электрических цепей [Текст]: учебник для ВУЗов/ Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев. – СПб.: «Лань», 2002. – 426 с.: ил.
2. Бакалов В. П. Основы анализа цепей [Текст]: учебное пособие для ВУЗов/ Бакалов В. П., Журавлева О.Б., Крук Б.И. – М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 591 с.: ил.
3. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей [Текст]: учебник для ВУЗов/ А К. Лосев. – М.: Высшая школа, 1987. – 512 с.: ил.
4. Попов В. П. Основы теории цепей [Текст]: учебник для ВУЗов/ В. П. Попов. - М.: Высшая школа, 1985. – 496 с.: ил.
5. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей [Текст]: учебник для ВУЗов/ А. Ф. Белецкий. - М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.: ил.

УЧЕБНО – МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Компьютерный класс, ПЭВМ, ПК *Micro-CAP 11*, ПК *MathCAD* .

Исследование частотных характеристик линейных электрических цепей

Цель работы: освоение методики расчета и экспериментального определения частотных характеристик линейной электрической цепи, представляемой в виде четырехполюсника.

1. Основные теоретические сведения и примеры

Частотные характеристики являются компонентами комплексных функций электрической цепи. В данной работе рассматривается один тип таких функций – **комплексная функция передачи напряжения (КФПН):**

$$H_u(j\omega) = \underline{H_U}(\omega) = \frac{U_{m \text{ Вых}}(\omega)}{U_{m \text{ Вх}}(\omega)} = |\underline{H_U}(\omega)| \cdot \exp\{j\psi_U(\omega)\}, \quad (1)$$

где $\underline{U_{m \text{ Вых}}}(\omega) = U_{m \text{ Вых}}(\omega) \cdot \exp[j\psi_{\text{Вых}}(\omega)]$ и $\underline{U_{m \text{ Вх}}}(\omega) = U_{m \text{ Вх}}(\omega) \cdot \exp[j\psi_{\text{Вх}}(\omega)]$ – комплексные амплитуды выходного и входного гармонических напряжений одинаковой частоты ω ;

$$U_{m \text{ Вых}}(\omega) = |\underline{U_{m \text{ Вых}}}(\omega)| \quad \text{и} \quad U_{m \text{ Вх}}(\omega) = |\underline{U_{m \text{ Вх}}}(\omega)| \quad \text{– амплитуды;}$$

$\psi_{\text{Вых}}(\omega)$ и $\psi_{\text{Вх}}(\omega)$ – начальные фазы этих напряжений.

Поэтому КФПН можно представить в виде

$$\underline{H_U}(\omega) = \frac{U_{m \text{ Вых}}(\omega)}{U_{m \text{ Вх}}(\omega)} \cdot \exp\{j[\psi_{\text{Вых}}(\omega) - \psi_{\text{Вх}}(\omega)]\}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что КФПН состоит из двух компонент:

- **амплитудно-частотной характеристики цепи (АЧХ)**, отражающей изменение амплитуды гармонического напряжения частоты при прохождении через электрическую цепь

$$|H_U(\omega)| = \frac{U_{m \text{ Вых}}(\omega)}{U_{m \text{ Вх}}(\omega)} ; \quad (3)$$

- **фазочастотной характеристики цепи** (ФЧХ), отражающей фазовый сдвиг напряжения на выходе по отношению к входному напряжению

$$\psi_U(\omega) = \arg H_U(\omega) = \psi_{\text{Вых}}(\omega) - \psi_{\text{Вх}}(\omega). \quad (4)$$

Еще две частотные характеристики можно ввести, если представить

КФПН в алгебраической форме $H_U(\omega) = D_U(\omega) + jQ_U(\omega),$

где $D_U(\omega) = \operatorname{Re}\{H_U(\omega)\}$ – **вещественная частотная характеристика** (ВЧХ);

$Q_U(\omega) = \operatorname{Im}\{H_U(\omega)\}$ – **мнимая частотная характеристика** (МЧХ).

Кроме КФПН в некоторых случаях дополнительно определяют

$$H_I(\omega) = \frac{I_{m \text{ Вых}}(\omega)}{I_{m \text{ Вх}}(\omega)}$$

комплексную функцию передачи тока

или комплексную

$$Y_{\text{пер}}(\omega) = \frac{I_{m \text{ Вых}}(\omega)}{U_{m \text{ Вх}}(\omega)}$$

функцию проводимости передачи

Следует заметить, что в большинстве случаев интерес представляют

зависимости от циклической частоты $f = \omega/2\pi$ Гц. Это учтем ниже.

Пример 1. Определить КФПН для дифференцирующего **RC**-контура (рис. П1.1), в котором $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 150$ Ом, $C = 50$ нФ = $50 \cdot 10^{-9}$ Ф, . Рассчитать и построить частотные характеристики цепи в зависимости от циклической частоты f .

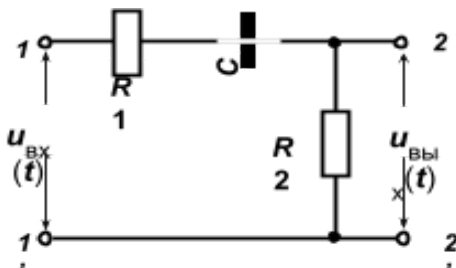


Рис.
П1.1

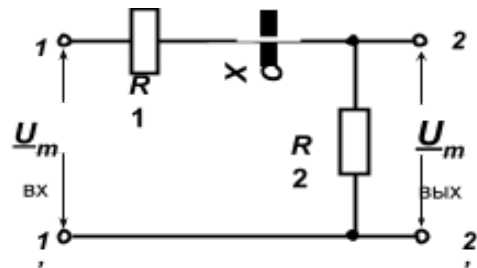


Рис.
П1.2

$\underline{U_{m_{\text{BX}}}} = U_{m_{\text{BX}}} e^{j\Psi_{\text{BX}}}$. Поскольку цепь линейная, выходное напряжение записываем аналогично:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{m \text{ ВЫХ}} \cos(\omega t + \psi_{\text{ВЫХ}}) \quad \text{и, следовательно,}$$

$$\underline{U_{m \text{ Вых}}} = U_{m \text{ Вых}} e^{j\psi_{\text{Вых}}}$$

. Все величины, входящие в

выражение $u_{\text{вых}}(t)$ пока неизвестны. Для определения

их используем метод комплексных амплитуд (комплексный метод). Изображаем схему замещения цепи для комплексов (рис. П1.2). Выделяем в этой схеме два комплексных

сопротивления: продольное $\underline{Z}(f)_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C}$ и поперечное $\underline{Z}(f)_2 = R_2$ (см. рис. П1.3).

Учитывая, что последовательная цепочка из двух сопротивлений является делителем входного напряжения, определяем комплексную амплитуду напряжения на выходе цепи

$$\frac{U_{m \text{ Вых}}(f)}{U_{m \text{ Вх}}} = \frac{\underline{Z}(f)_2}{\underline{Z}(f)_1 + \underline{Z}(f)_2}.$$

Затем находим выражение для КФПН

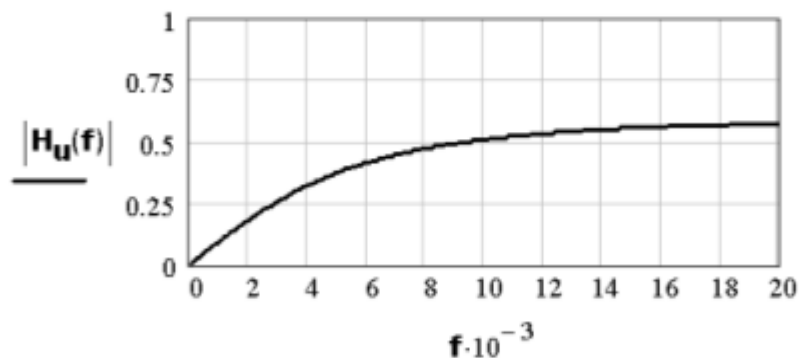
$$H_U(f) = \frac{U_{m_{\text{BYX}}}(f)}{U_{m_{\text{BX}}}} = \frac{\underline{Z}(f)_2}{\underline{Z}(f)_1 + \underline{Z}(f)_2}$$

Численный расчет и графические построения частотных характеристик выполняем в программном комплексе MathCAD (см. ниже файл расчета).

$$\begin{aligned} & \text{\texttt{Çàääâì ðàçìáðû àññèâîâ ääííûð:}} \quad \mathbf{n} := 1..2 \\ & \text{\texttt{Íîáð îãðâîâî ýèáìáòà àññèâîâ}} \quad \mathbf{ORIGIN} := 1 \\ & \text{\texttt{Ââîæè íéìóþ äæèèöö}} \quad \mathbf{j} := \sqrt{-1} \\ & \text{\texttt{Ââîæè çíà÷áëý àðàìáððîâ ýèáìáòîâ öâè}} \\ & \mathbf{R} := \begin{pmatrix} 100 \\ 150 \end{pmatrix} \quad \hat{\mathbf{i}} \qquad \mathbf{C} := 0.1 \cdot 10^{-6} \quad \hat{\mathbf{o}} \\ & \text{\texttt{Îðääåýàì îäöü ðääèèâîâî ñîððèèæåáëý}} \quad \omega(\mathbf{f}) := 2 \cdot \pi \cdot \mathbf{f} \\ & \mathbf{XC(f)} := \frac{1}{\omega(\mathbf{f}) \cdot \mathbf{C}} \\ & \text{\texttt{Îðääåýàì èñîèèñîâî ñîððèèæåáëý äððæ}} \\ & \mathbf{Z(f)} := \begin{pmatrix} \mathbf{R_1 - j \cdot XC(f)} \\ \mathbf{R_2} \end{pmatrix} \\ & \text{\texttt{Çàääâì æèàçí èçìáíý ÷àñòíæý áññòðîâý ÷àñòíóù}} \\ & \text{\texttt{ððæèððèèè}} \quad (\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{o}}) \qquad \mathbf{f} := 0, 10.. 2 \cdot 10^4 \quad \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{o}} \end{aligned}$$

Nòdīèl ÷ àñòìòíúâ òàðàéòàðèñòèèè òâìè:

àìñèèòóâíí-÷àñòìòíóð òàðàéòàðèñòèèè(éèó) $|H_U(f)|$

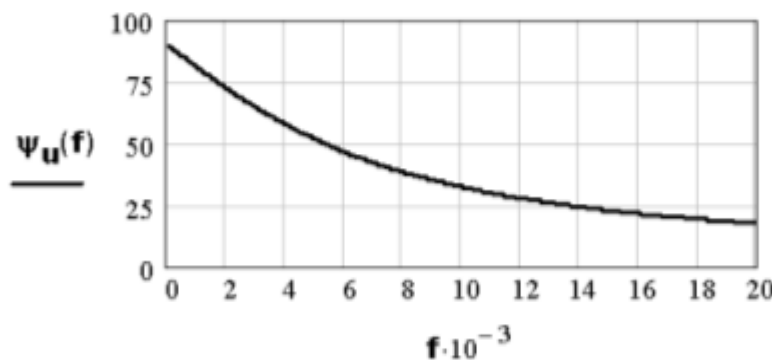


Đèñ. ĩ1.4

êÃö

è òàçí÷àñòìòíóð òàðàéòàðèñòèèè(éèó) $\arg(H_U(f))$,

ĩòââñòàâëÿÿ ââ â òàðàçí(éèó) $\psi_U(f) := \left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \arg(H_U(f))$



Đèñ. ĩ1.5

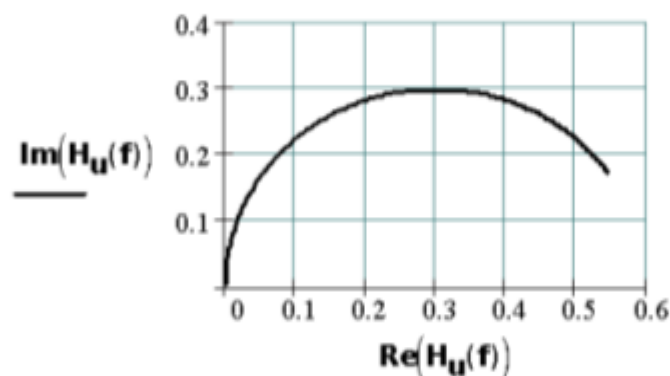
êÃö

Àèàèl, ÷òí àèòóâííòèòóðùèé éííòóð ñíçâââò ìà âúòíââ ìàìöÿæâíè ìâðâæàðùââ ĩ òàçâ âòíâíâ ìàìöÿæâíèâ.

Nòdīèl **ÉŌĭĭ** $H_U(f)$ ìà éñìèâèññíé ĩèññèñòè, èññìèuçóÿ â èà÷àñò:

éññòàèìàò **ââùâñòââííóð ÷àñòìòíóð òàðàéòàðèñòèèè(éèó)**

$\text{Re}(H_U(f))$ è **ìíèíóð ÷àñòìòíóð òàðàéòàðèñòèèè(éèó) - $\text{Im}(H_U(f))$**



Đèñ. ĩ1.6

Η άσκηση αυτή αφορά τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς $H_u(f)$, όταν η είσοδος είναι τάση $U_{\text{ει}}(f)$ και η έξοδος είναι τάση $U_{\text{εξ}}(f)$. Η συνάρτηση μεταφοράς ορίζεται ως $H_u(f) = \frac{U_{\text{εξ}}(f)}{U_{\text{ει}}(f)}$. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι ένας αριθμός που εξαρτάται από τη συχνότητα f . Η συνάρτηση μεταφοράς είναι ένας αριθμός που εξαρτάται από τη συχνότητα f . Η συνάρτηση μεταφοράς είναι ένας αριθμός που εξαρτάται από τη συχνότητα f .

Рассмотрим другой пример

Пример 2. Определить КФПН для электрической цепи с колебательным контуром третьего вида (рис. П2.1). Рассчитать и построить частотные характеристики цепи.

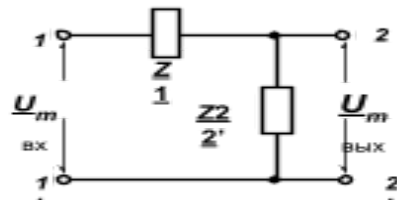
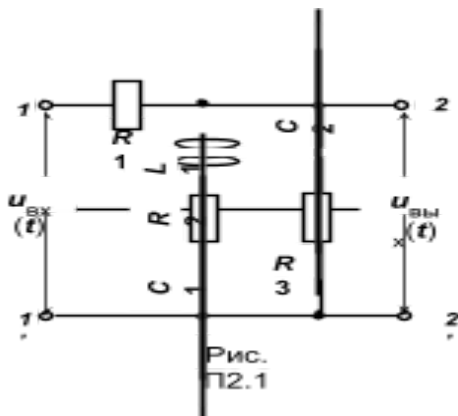


Рис. П2.2

Решение. Используем ту же методику, что в предыдущем примере. На рис. П2.2 приведена эквивалентная схема для комплексов после преобразования (сворачивания).

Численный расчет и графические построения частотных характеристик выполняем в программном комплексе MathCAD (см. ниже файл расчета).

Δααααί δααααδύ ίαηηέαίâ äáííüð: $n := 1..3$

Íñâð ïâðáíâí ýéâíáíðâ ïàηηέαίâ **ORIGIN**:= 1

Ââíâè ïéííð ãäèéðð $j := \sqrt{-1}$

Ââíâè çá÷áíèý ïâðáíâððíâ ýéâíáíðíâ ðâíè

$$R := \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^3 \\ 40 \\ 15 \end{pmatrix} \hat{=} \quad C1 := 60 \cdot 10^{-9} \text{ Ô} \quad L := 50 \cdot 10^{-3} \text{ Āí} \\ C2 := 10 \cdot 10^{-9} \text{ Ô}$$

Íðâââäýâí ïíäðèè ðâäèðèáíüð ñíðíðèäèäèáíèé

$$\omega(f) := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$XL(f) := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad XC1(f) := \frac{1}{\omega(f) \cdot C1} \quad XC2(f) := \frac{1}{\omega(f) \cdot C2}$$

Íðâââäýâí èíííèäèñíüâ ñíðíðèäèäèáíèý äâðâé

$$Z(f) := \begin{bmatrix} R1 \\ R2 + j \cdot (XL(f) - XC1(f)) \\ R3 + j \cdot (0 - XC2(f)) \end{bmatrix} \quad Z2(f) := \frac{(Z(f)_2 \cdot Z(f)_3)}{(Z(f)_2 + Z(f)_3)}$$

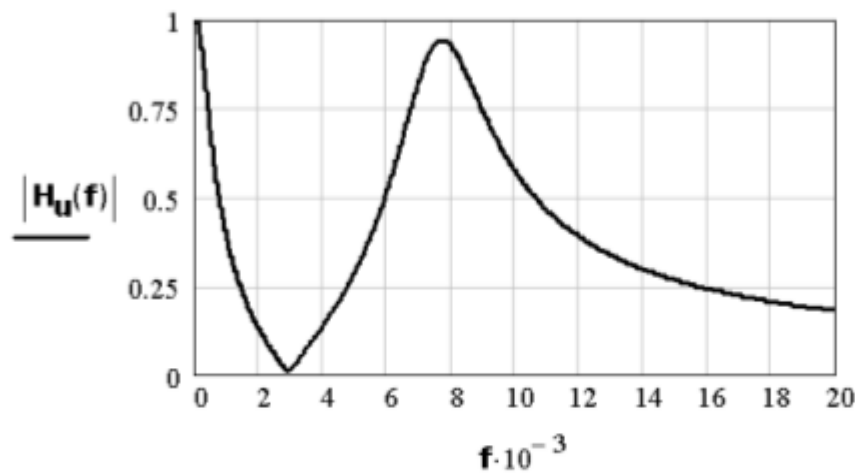
Çààààì àèàíàçíř èçìáíáíëŸ ÷àñòìòú è ááëë÷èíó òàðàéòáðëñðèë ÷àñòìòìúò òàðàéòáðëñðèë $f := 0, 10 \dots 2 \cdot 10^4$ (Äö)

ÈññèáêñíàŸ ôóíéöëŸ ìáðáà÷è ìáíðŸæáíëŸ (ÊÕÍÍ)
 çàààííé òáíè ñòáááëŸáðñŸ áúðàæáíëáì:

$$H_U(f) := \frac{Z(f)}{Z(f)_1 + Z(f)} \quad (1)$$

Ñòðíèì ÷àñòìòìúá òàðàéòáðëñðèëë òáíè:

àííèèðóáíř-÷àñòìòìóð òàðàéòáðëñðèëë $|H_U(f)|$

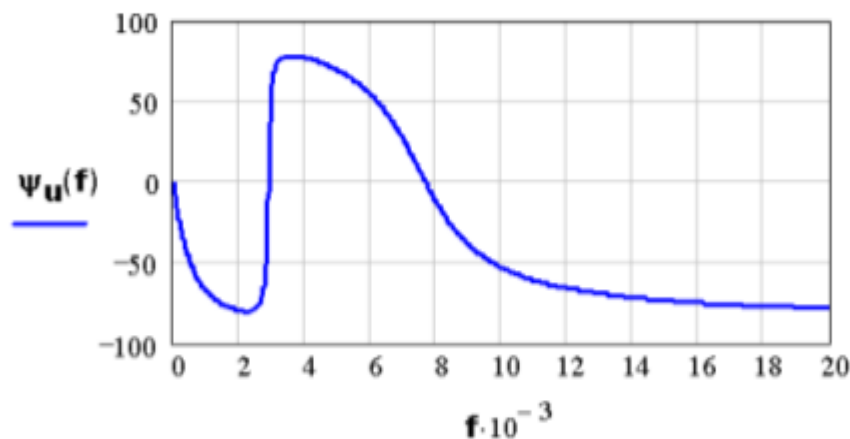


Đèñ. Ĩ2.3

êÄö

è òàçíř-÷àñòìòìóð òàðàéòáðëñðèëë $\arg(H_U(f))$,

ìðááñòááëŸŸ áá á òàááíðà(Ÿ) := $\left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \arg(H_U(f))$,



Đèñ. Ĩ2.4

êÄö

Ñòðíèì **ÊÕÍÍ** $H_U(f)$ ìá èññèáêñíé ìèññèñðè, èññèüçóŸ á èà÷àñòá

èñðáèíàð **ááúáñòááííóð ÷àñòìòìóð òàðàéòáðëñðèëë**

Re(H_U(f)) è ìíèíóð ÷àñòìòìóð òàðàéòáðëñðèëë **Im(H_U(f))**



Частотные характеристики всех типов можно получить, используя для моделирования процессов в электрических цепях программные системы **MicroCAP** или **Electronics Workbench**. На рис. П2.7 приведены схема цепи, рассмотренной в примере 2, и результаты моделирования в системе **MicroCAP**. Амплитуда источника гармонического напряжения **V1** равна 1 В, частота изменялась в заданном диапазоне.

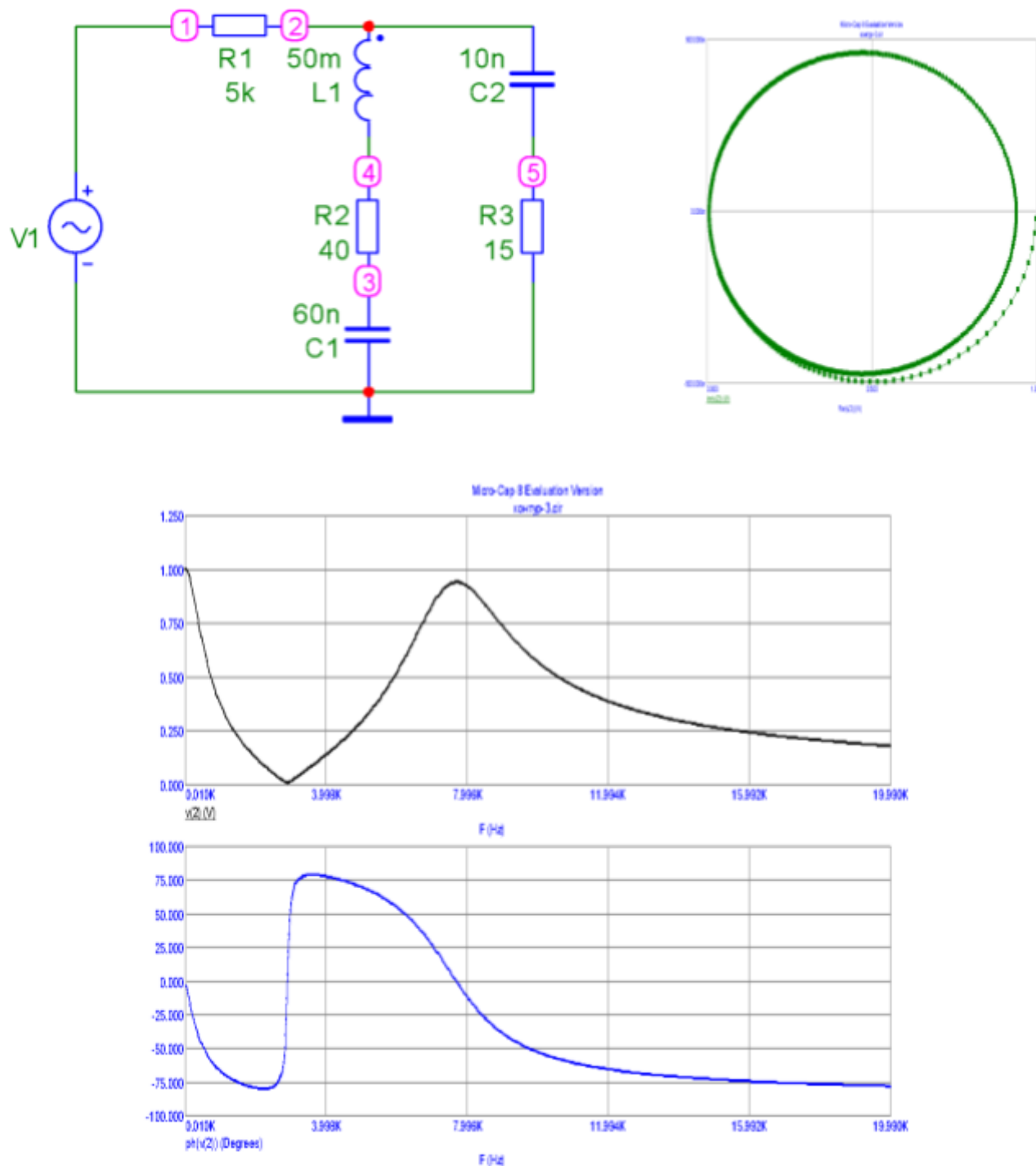


Рис. П2.7. Частотные характеристики, полученные посредством моделирования в ПС **MicroCAP**

2. Исходные данные для исследований

Каждая бригада студентов получает от преподавателя индивидуальное задание – одну из схем линейных цепей, изображенных на рисунках 1÷34. Параметры элементов приведены в табл. 1. Вариант задания состоит из номера схемы, предназначенной для исследований, и номера варианта значений параметров элементов, например, 5-2.

Параметры элементов

Таблица 1

Элементы		$R1, \text{Ом}$	$R2, \text{Ом}$	$R3, \text{Ом}$	$R4, \text{Ом}$	$R5, \text{Ом}$	$C1, \text{нФ}$	$C2, \text{нФ}$	$L1, \text{мГн}$
В а р и а н т ы	1	150	300	350	300	60	150	50	30
	2	200	200	300	200	90	60	100	45
	3	250	450	1200	450	110	250	150	35
	4	450	350	500	350	1250	45	20	25
	5	650	70	30	100	150	300	100	50
	6	550	560	600	800	80	70	100	60
	7	500	680	600	1700	200	180	80	40

Индуктивность $L2 = 0.6 \cdot L1$

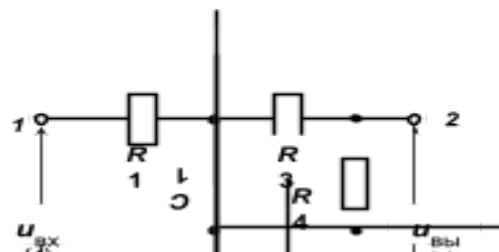
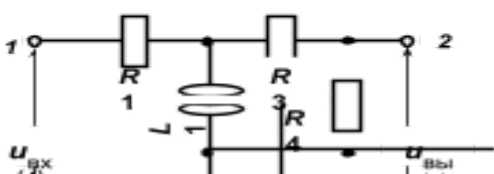
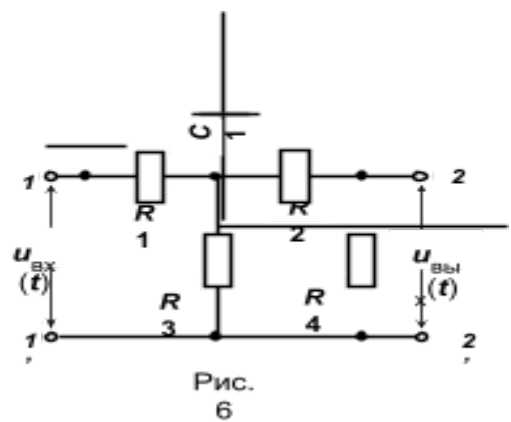
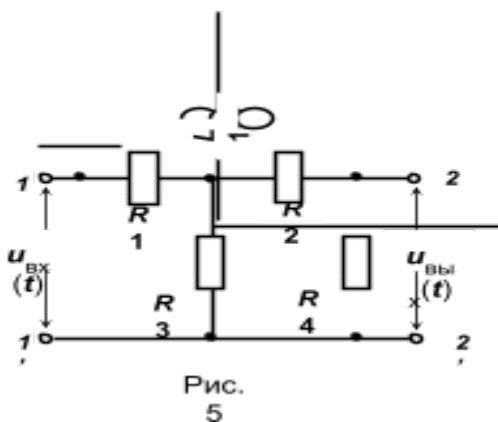
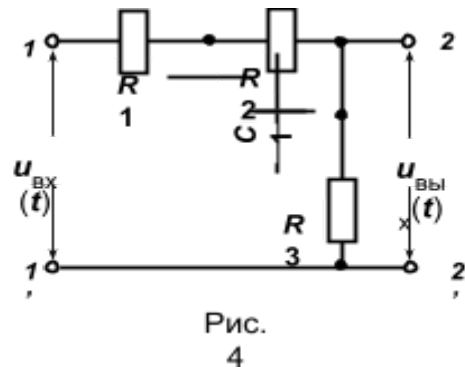
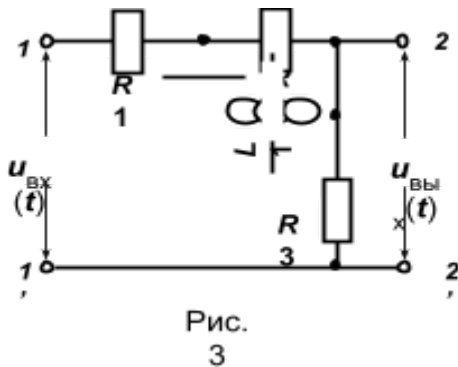
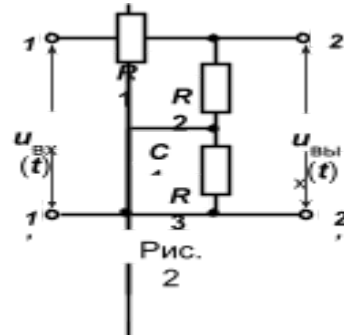
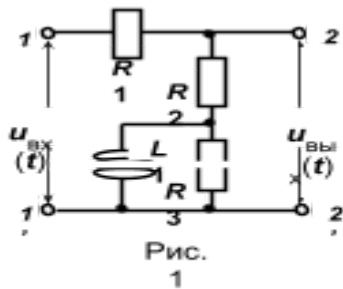
Номера схем и параметров элементов

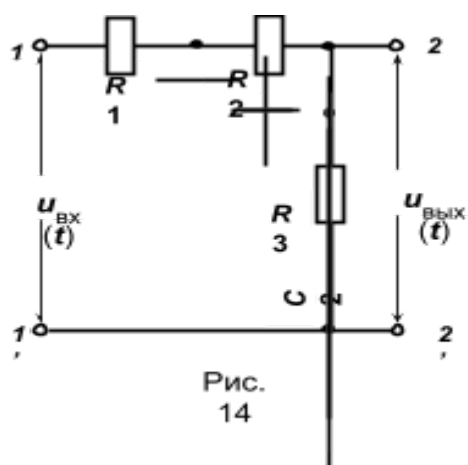
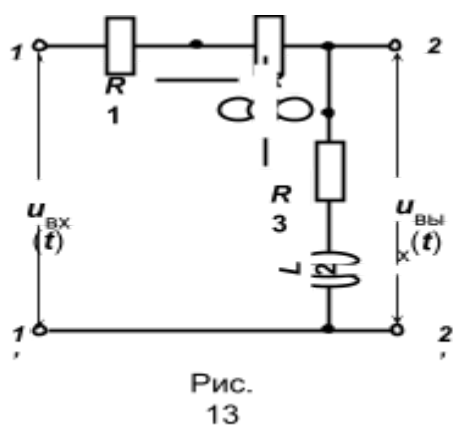
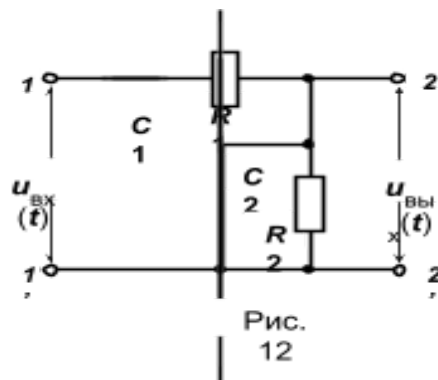
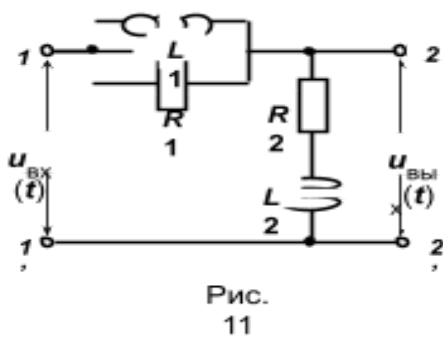
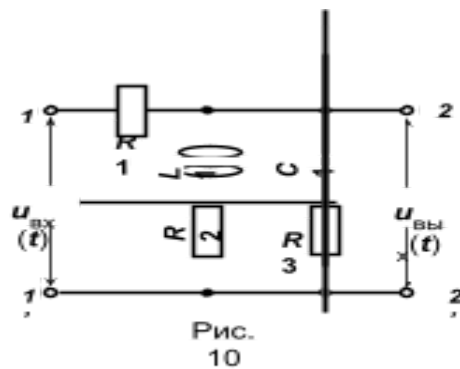
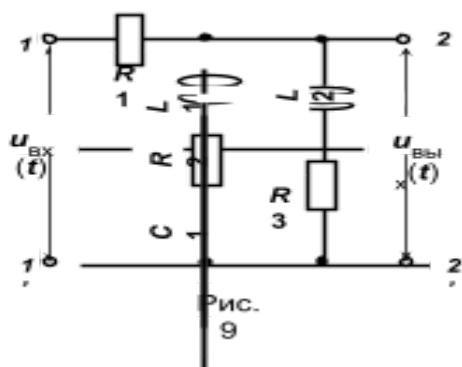
Таблица 2

№ в списке группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Схема	4	26	23	14	15	18	2	25	19	10	11	12	1	3
Параметры	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	3	5	2	3
№ в списке группы	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Схема	16	6	17	5	7	20	21	22	13	24	8	9	27	28
Параметры	5	4	3	2	1	3	5	2	4	5	3	5	2	3
№ в списке группы	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Схема	30	34	14	31	32	33	13	7	27	24	8	19	21	4
Параметры	6	7	4	2	7	1	5	4	3	2	6	6	7	5

3. Содержание исследований

- 3.1. Расчет комплексной функции передачи напряжения (КФПН) заданной цепи: получение аналитических выражений, построение графиков частотных характеристик при использовании ПК MathCAD. Студентам предлагается взять за основу какой-либо файл с примером и выполнить индивидуальное задание, редактируя содержание файла.
- 3.2. Получение графиков частотных характеристик цепи посредством моделирования процессов с помощью ПК *Micro-CAP 12*.
- 3.3. Сопоставление результатов расчетов и моделирования. Оформление отчета.





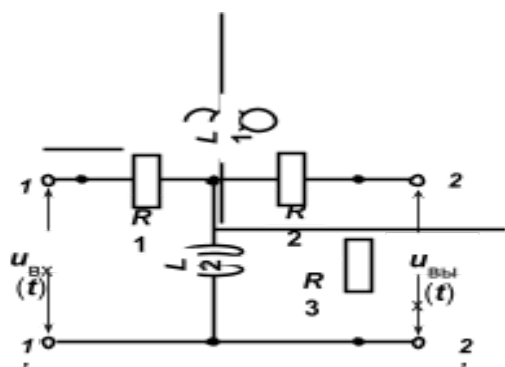


Рис.
15

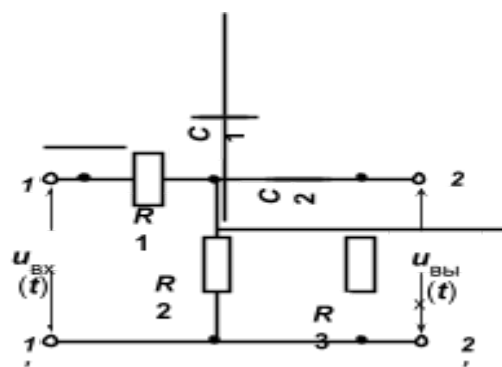


Рис.
16

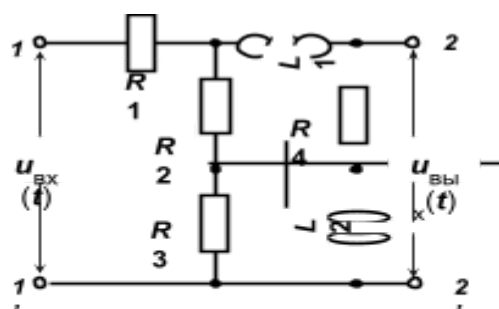


Рис.
17

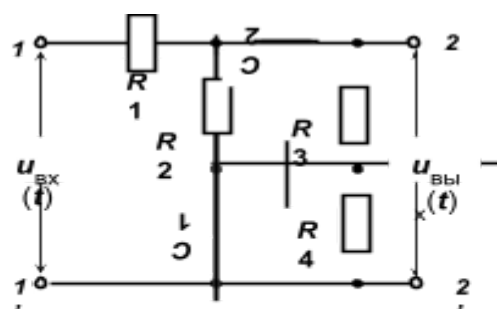


Рис.
18

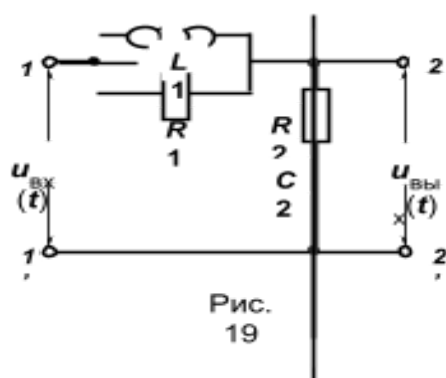


Рис.
19

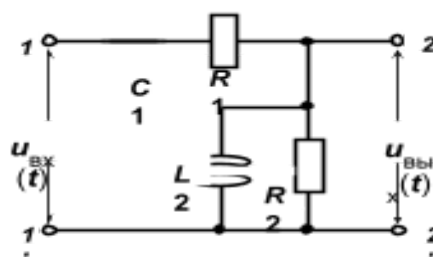


Рис.
20

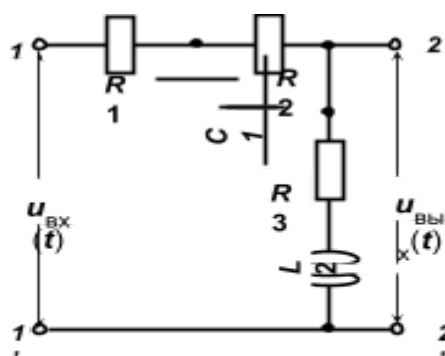


Рис.
21

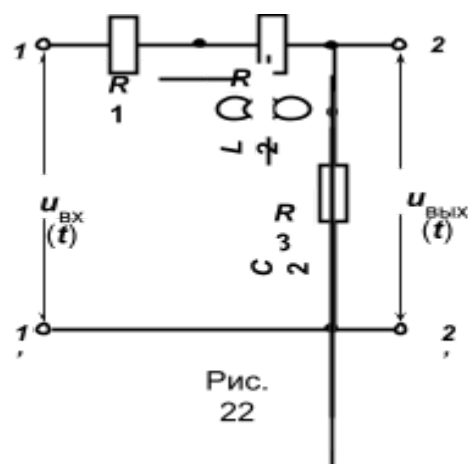


Рис.
22

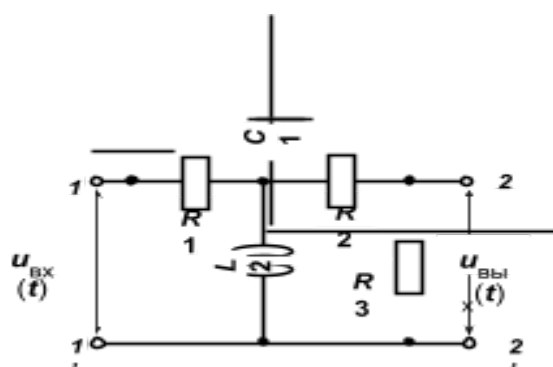


Рис.
23

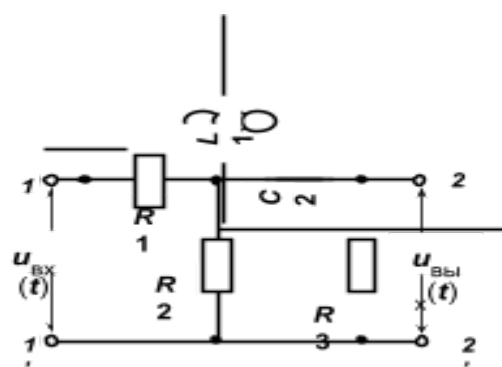


Рис.
24

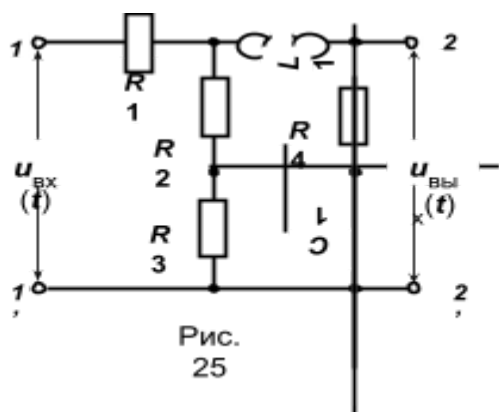


Рис.
25

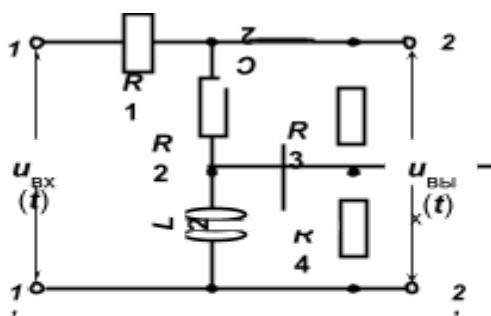


Рис.
26

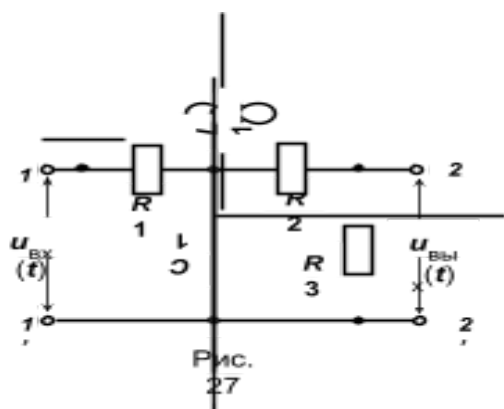


Рис.
27

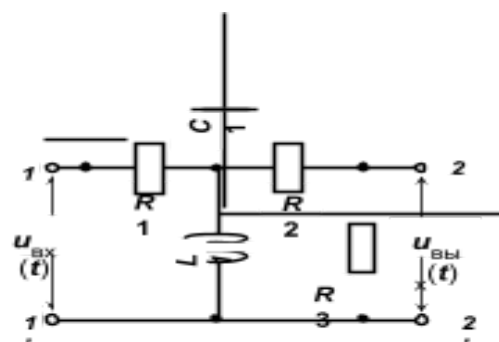


Рис.
28

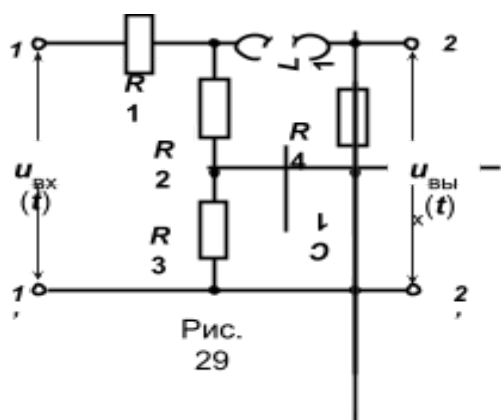


Рис.
29

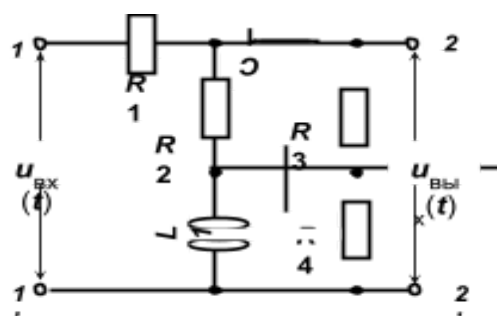
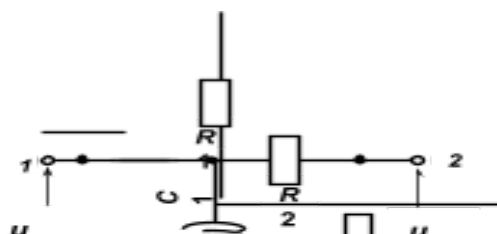
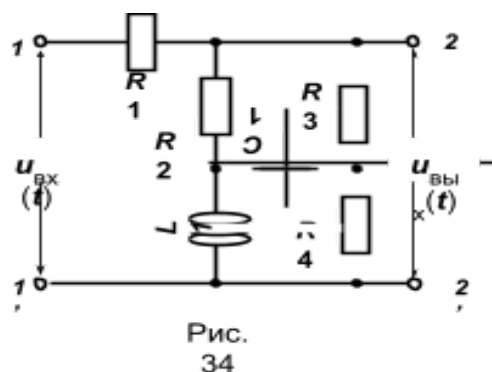
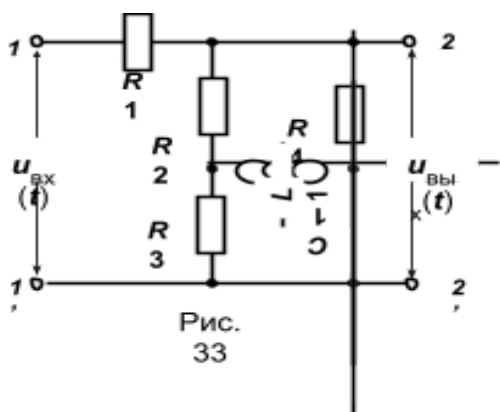


Рис.
30





Поясним особенности выполнения исследования частотных свойств электрической цепи в среде ПК **Micro-CAP 12**.

Вызываем ПК Micro-Cap 12 и создаем чистое рабочее поле для ввода навой схемы.

Я полагаю, что Вы уже умеете делать это. В противном случае и при всех других затруднениях обращайтесь к моему пособию:

«Схемотехническое моделирование электронных и электрических устройств в среде программного комплекта Micro-CAP 11». Пособие находится здесь же.

На новом рабочем поле создаем схему заданного Вам четырехполюсника. Начинать следует с источника. На панели для быстрого ввода выбираем «**Voltage Source**», помещаем на поле, щелкаем «мышкой» и в открывшемся окне устанавливаем вид напряжения источника – **SIN** (см. рис. 35). Никаких изменений в окошках не делаем (это специфика анализа в частотной области). Не забываем, что нужно уменьшать размер шрифта до 8÷9, как делали в предыдущей работе при вводе остальных компонентов схемы.

После ввода других компонентов получаем схему цепи для испытаний (рис. 36)

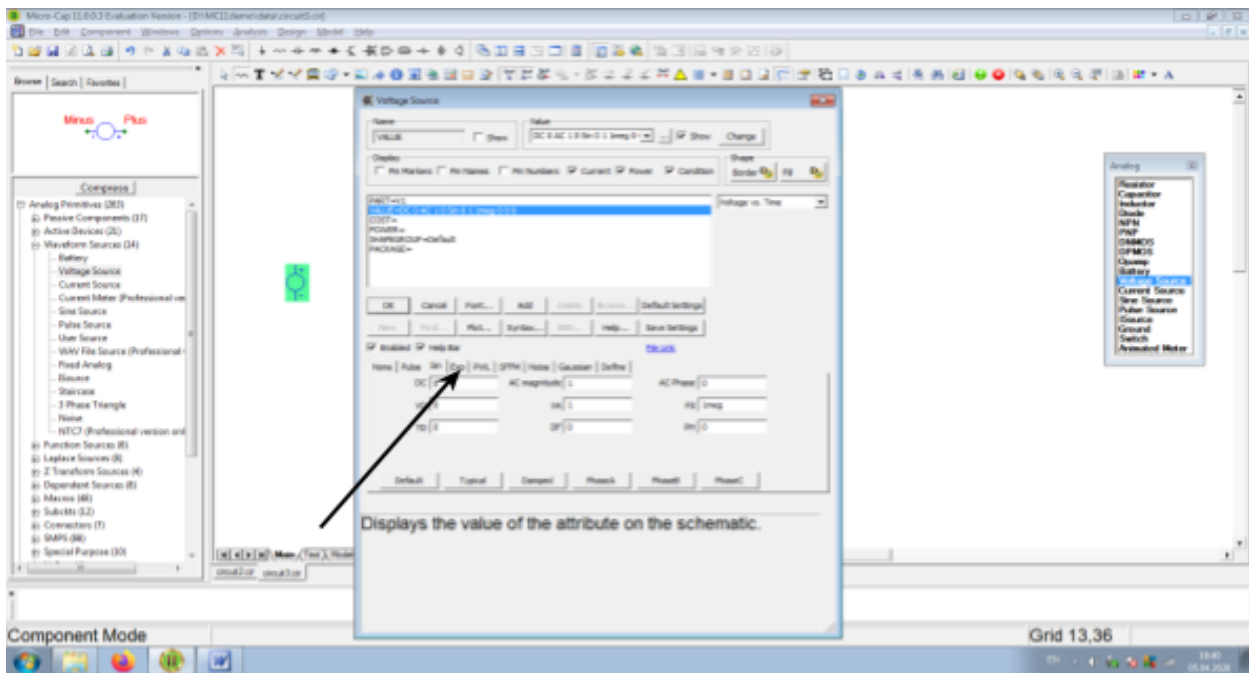


Рис.
35

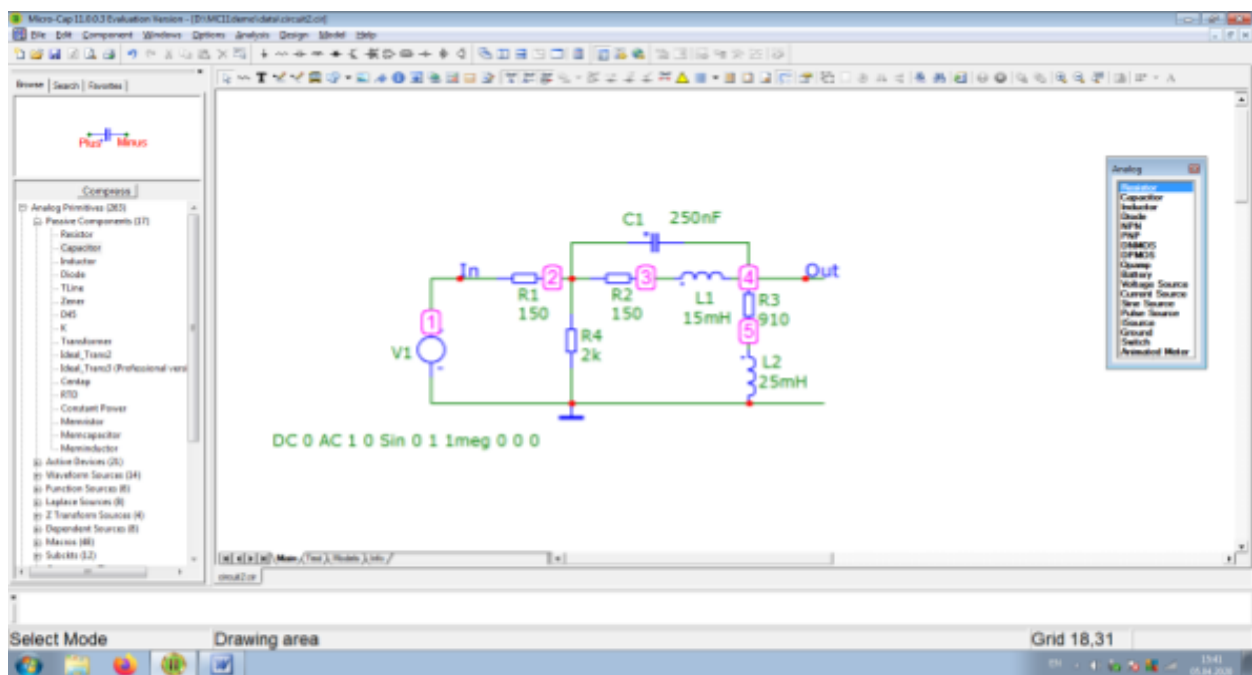


Рис.
36

Будем использовать режим анализа, который называется:
«Анализ по переменному току при малом сигнале **AC Analysis (Alt+2)**».

В режиме **AC Analysis** источник, введенный в схему, только задает место подключения гармонического возмущения с переменной частотой.

При расчете частотных характеристик комплексная амплитуда этого сигнала автоматически полагается равной 1 В, начальная фаза нулевая (независимо от того, как заданы значения параметров модели сигнала), а частота меняется в пределах, задаваемых в меню окна **AC Analysis Limits**.

Если имеется один источник сигнала, то выходные напряжения будут совпадать с частотными характеристиками устройства.

После нажатия клавиш **Alt+2** и перехода в режим **AC Analysis** ПК **MC II** проверяет правильность составления схемы. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному решению системы нелинейных алгебраических уравнений и открывает окно (рис. 37) задания параметров моделирования **AC Analysis Limits**. В противном случае выдается сообщение о наличии ошибок.

О структуре окна задания параметров моделирования смотрите в пособии (стр. 28).

Для первого прогона ставим широкий диапазон частот: от 10 Гц до 1 МГц (окошко «Frequency Range») и логарифмический масштаб по оси частот.

После запуска моделирования получаем три графика (рис. 37):

АЧХ в децибелах $20 \lg H_U(f) = db(V(Out))$;

АЧХ в «размах» $H_U(f) = V(Out)$;

ФЧХ $\Phi_U(f)$

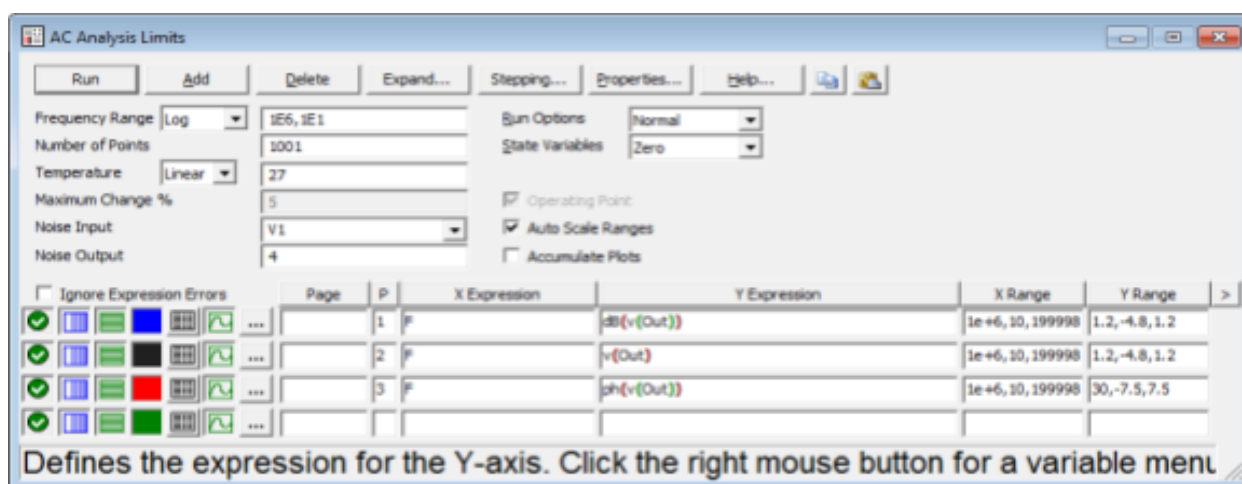


Рис. 37. Вид окна **AC Analysis Limits** после редактирования

После запуска моделирования получаем три графика (рис.38):

АЧХ в децибелах $20 \lg H_U(f) = db(V(Out))$;

АЧХ в «размах» $H_U(f) = V(Out)$;

ФЧХ $\Phi_U(f)$

Увеличиваем толщину линий графиков.

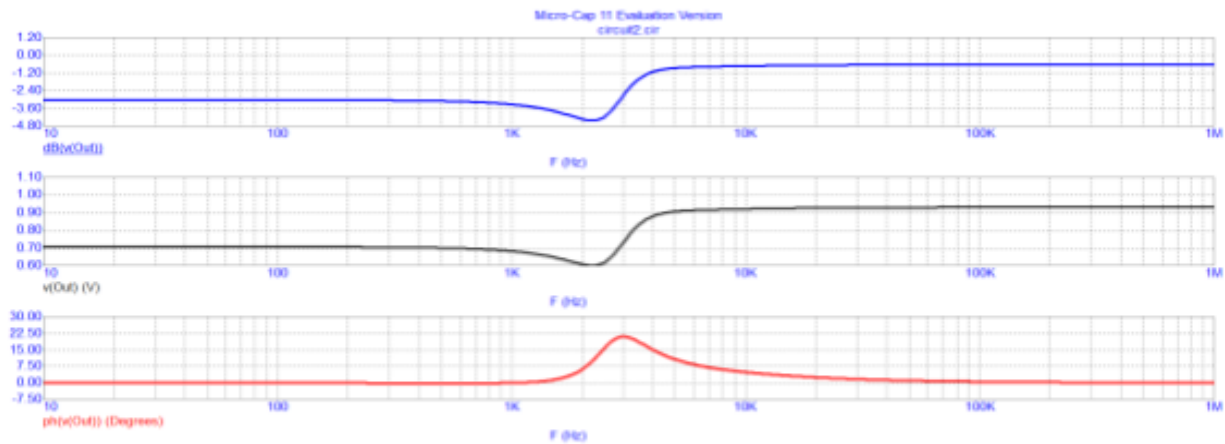


Рис. 38. Частотные характеристики заданного четырехполюсника

Отмечаем, что выбранный диапазон великоват. Нажимаем F9. Появляется окно задания параметров моделирования. Редактируем границы диапазона (рис. 39).

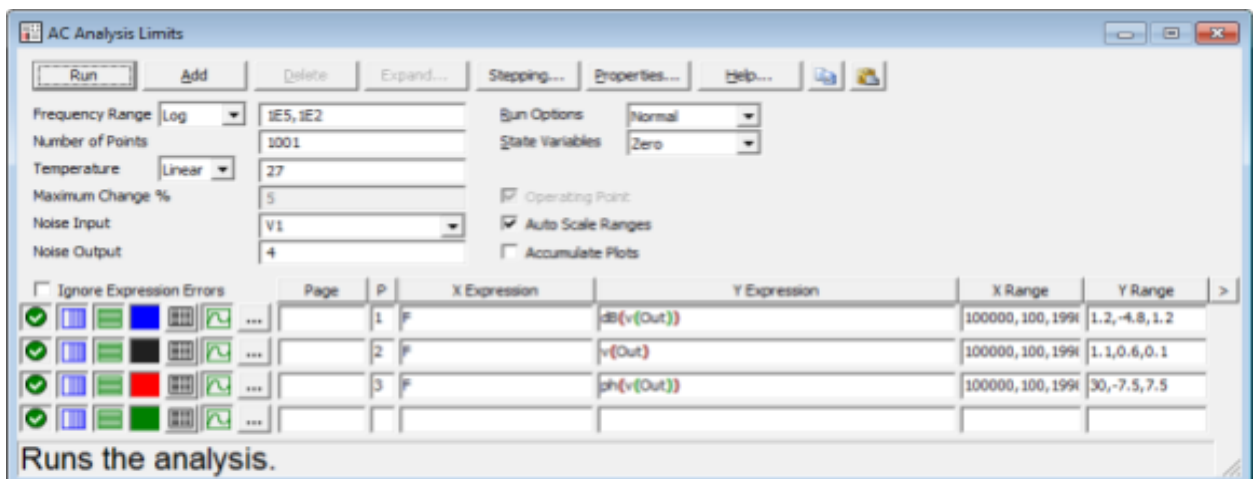


Рис. 39. Окно после редактирования

Получаем характеристики в окончательном виде (рис. 40). Сравниваем их с характеристиками, полученными в результате расчета. Делаем выводы.

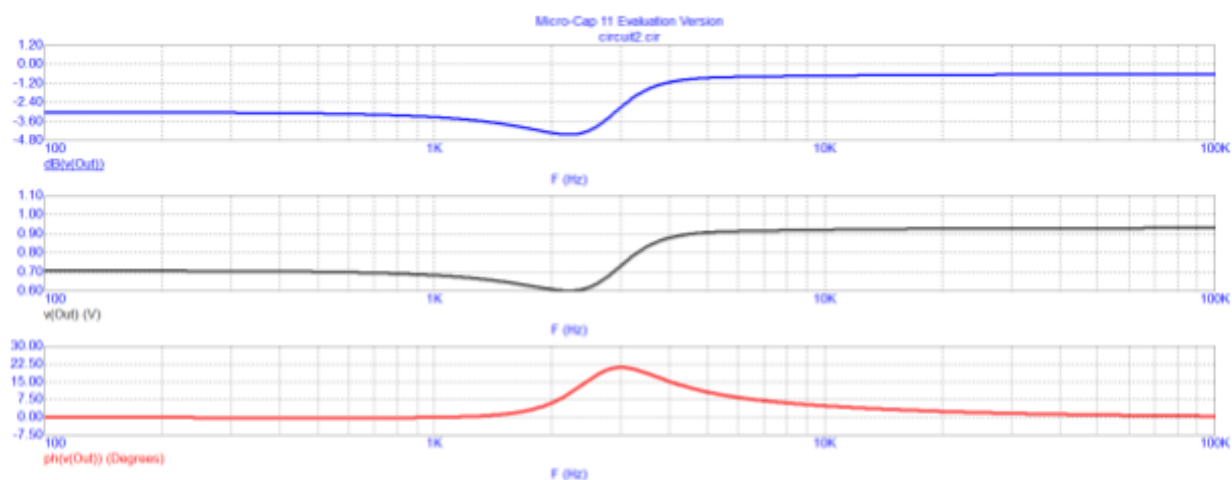


Рис. 40. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики заданного четырехполюсника

Самим разобраться с построением годографа в Micro-Cap (пособие)