

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Кафедра компьютерных систем в управлении
и проектировании (КСУП)**

А. А. Шибает

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Учебное методическое пособие

2016

Корректор: Осипова Е. А.

Шибает А. А.

Электротехника, электроника и схемотехника: учебное методическое пособие. — Томск: Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2016. — 78 с.

Учебное методическое пособие содержит введение, методические указания по решению задач по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника», а также методические указания к выполнению трех лабораторных работ и приложение с материалами по использованию моделирующего пакета MicroCap 11.

Материал по лабораторным работам включает банки индивидуальных заданий, содержание и программы лабораторных работ, а также подробно изложенные примеры выполнения работ. Особое внимание при этом уделяется практике работы в моделирующей среде — в пакете MicroCap 11.

Учебное методическое пособие по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника» предназначено для студентов факультета дистанционного обучения ТУСУР.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Введение	4
2 Методические указания по решению задач.....	5
3 Лабораторная работа № 1 «Изучение частотных и временных свойств линейных цепей»	24
4 Лабораторная работа № 2 «Опытное определение параметров полупроводниковых приборов»	42
5 Лабораторная работа № 3 «Изучение автогенераторов»	56
Литература	71
Приложение	72

1 ВВЕДЕНИЕ

Учебное методическое пособие включает материалы, необходимые для организации самостоятельной работы:

- методические указания к решению ряда задач;
- банки индивидуальных заданий, программу работ и методические указания к выполнению лабораторных работ;
- список рекомендуемой литературы;
- приложение.

Выбор варианта лабораторных работ осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \operatorname{div} 100,$$

где V — искомый номер варианта,
 N — общее количество вариантов,
 div — целочисленное деление,
при $V = 0$ выбирается максимальный вариант,
 K — код варианта.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

В данном разделе представлены примеры решения простых задач, связанных с физическими характеристиками сигналов.

Задача 1. Динамический диапазон сигнала по напряжению $D_U = 23$ дБ. Во сколько раз максимальная мощность этого сигнала превышает минимальную мощность?

Решение. Применительно к одному и тому же сигналу, как известно, динамический диапазон сигнала по напряжению D_U и динамический диапазон сигнала по мощности D_P выражаются соотношениями:

$$D_P = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \text{ (дБ)}, \quad D_U = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \text{ (дБ)}.$$

Учитывая, что

$$D_P = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10 \lg \frac{U_{\max}^2}{U_{\min}^2} = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = D_U \text{ (дБ)} = 23.$$

$$\text{Откуда } \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2,3 \text{ или } \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10^{2,3} = 199,526 \approx 200 \text{ (округления}$$

в ответах необходимы).

Ответ. Максимальная мощность сигнала превышает минимальную мощность в 200 раз.

Задача 2. Максимальное значение сигнала 1,14 В, минимальное значение сигнала 9 мВ. Во сколько раз максимальная мощность сигнала превышает минимальную мощность?

Решение. По аналогии с решением предыдущей задачи, имеем:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{U_{\max}^2}{U_{\min}^2} = \left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right)^2 = \left[\frac{1140}{9} \right]^2 = 16044.$$

Ответ. Максимальная мощность сигнала превышает минимальную мощность в 16000 раз.

Задача 3. Динамический диапазон сигнала по мощности $D_p = 53$ дБ. Во сколько раз максимальное значение сигнала превышает минимальное значение?

Решение. По аналогии с решением задачи 1, имеем:

$$\lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 5,3, \quad \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} = \sqrt{10^{5,3}} = 467.$$

Ответ. Максимальное значение сигнала превышает минимальное значение в 467 раз.

Задача 4. Максимальное значение сигнала 0,97 В, минимальное значение сигнала 16 мкВ. Каков динамический диапазон сигнала по мощности D_p ?

$$\text{Решение. } D_p = D_U = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = 20 \lg \frac{970000}{16} = 95,6 \text{ дБ.}$$

Ответ. Динамический диапазон сигнала по мощности D_p равен 95,6 децибел.

Задача 5. Динамический диапазон сигнала по напряжению $D_U = 48$ дБ. Максимальное значение мощности сигнала 1,46 Вт. Определите минимальное значение мощности сигнала.

Решение. На основании соотношений, приведенных при решении задачи 1, имеем

$$\lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 4,8,$$

откуда $P_{\min} = P_{\max} / 10^{4,8} = 1460000 / 10^{4,8} \text{ мкВт} = 23 \text{ мкВт}$.

Ответ. Минимальное значение мощности сигнала равно 23 микроватт.

Дополнительные сведения

Для пояснения решения двух следующих задач 6 и 7 приведем дополнительные сведения [2], касающиеся выпрямителей. На рисунках 2.1, *а* и 2.1, *б* показаны схемы однофазного однополупериодного выпрямителя (*а*)

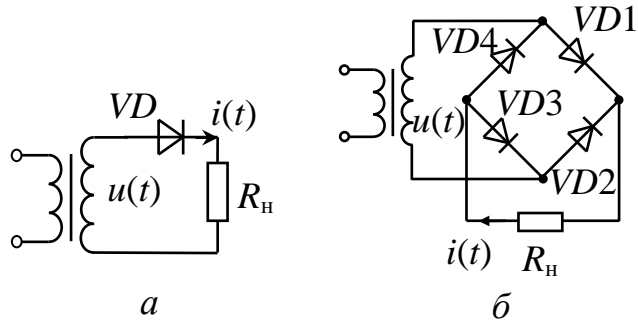


Рис. 2.1 — Однофазный однополупериодный выпрямитель (*а*), однофазный двухполупериодный выпрямитель (*б*)

и однофазного двухполупериодного выпрямителя (*б*). К диодному вентилю *VD* на первой схеме и к мостовому диодному вентилю *VD1—VD4* на второй схеме приложено гармоническое напряжение $u(t)$, при этом через нагрузку выпрямителей протекает ток $i(t)$. Осциллограммы напряжения $u(t)$ и токов $i(t)$ через нагрузку выпрямителей показаны на рис. 2.2 *а*, *б* и *в*.

Несложно понять, что в соответствии с формулами (2.3) и (2.4) учебного пособия [1] средневывпрямленное значение тока за период при однополупериодном выпрямлении (рис. 2.2, *б*)

$$\text{равно } I_{01T} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} I_m \cos \Omega t dt = \frac{I_m}{\pi} \approx$$

$$0,318 I_m,$$

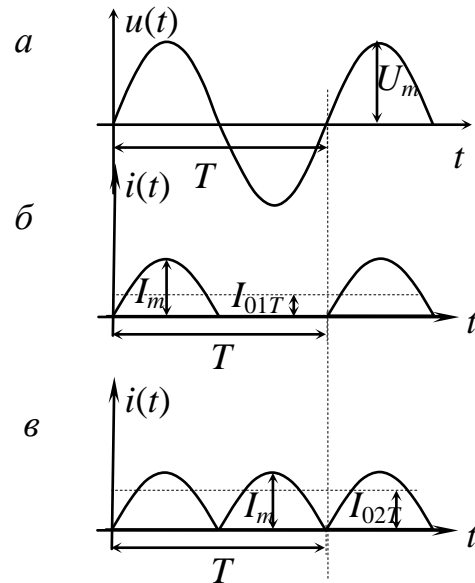


Рис. 2.2 — Осциллограммы напряжения (*а*) и токов (*б* и *в*) через нагрузку выпрямителей

а при двухполупериодном выпрямлении (рис. 2.2, в) равно

$$I_{02T} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I_m |\cos \Omega t| dt = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637 I_m.$$

Эти соотношения лежат в основе решения задач, примеры которых рассмотрены далее.

Задача 6. Через резистор величиной 75 Ом протекает однополупериодный ток (при однополупериодном выпрямлении гармонического колебания). В резисторе выделяется мощность 1 Вт. Определите среднее значение тока.

Решение. Исходные данные: $R = 75$ Ом, $P = 1$ Вт. Удобно выполнить решение, привлекая понятие амплитуды тока I_m через нагрузку выпрямителя, под которой следует понимать резистор, поименованный в тексте задачи. Мощность P , выделяемая в резисторе R , равна

$$P = \frac{I_m^2}{2} R,$$

откуда $I_m = \sqrt{\frac{2P}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{75}} = 0,163$ А.

Используя приведенное выше соотношение

$$I_{01T} = \frac{I_m}{\pi} \approx 0,318 I_m,$$

получаем $I_{01T} = 0,318 \cdot 0,163 = 0,0518$ А ≈ 52 мА.

Ответ. Среднее значение искомого тока I_{01T} равно 52 мА.

Задача 7. Через резистор величиной 120 Ом протекает двухполупериодный ток (при двухполупериодном выпрямлении гармонического ко-

лебания), среднее значение которого равно 650 мА. Определите мощность, выделяемую в резисторе.

Решение. Исходные данные: $R = 120 \text{ Ом}$, $I_{02T} = 650 \text{ мА}$. Ранее решение было пояснено. Используя соотношение $I_{02T} \approx 0,637 I_m$, определяем амплитуду тока I_m через нагрузку выпрямителя:

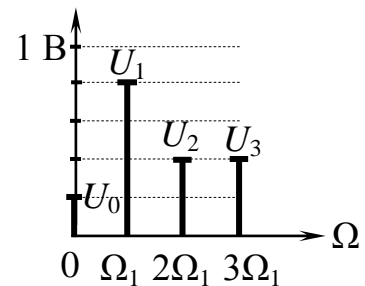
$$I_m = 0,65 / 0,637 = 1,02 \text{ А.}$$

Мощность, выделяемая в резисторе,

$$P = \frac{I_m^2}{2} \cdot R = \frac{1,02^2}{2} \cdot 120 = 62,4 \text{ Вт.}$$

Ответ. Мощность, выделяемая в резисторе нагрузки выпрямителя, равна 62,4 ватт.

Задача 8. На рисунке в масштабе показан спектр амплитуд некоторого периодического сигнала. Определите в ваттах среднюю за период мощность сигнала, выделяемую сигналом в сопротивлении 1 Ом.



Решение. Исходные данные, согласно рисунку к задаче — величины спектральных составляющих сигнала, равны $U_0 = 0,2 \text{ В}$, $U_1 = 0,8 \text{ В}$, $U_2 = 0,4 \text{ В}$, $U_3 = 0,4 \text{ В}$.

В соответствии с формулой (2.21) учебного пособия [1], средняя за период мощность сигнала P_T , выделяемая периодическим сигналом в сопротивлении 1 Ом, равна

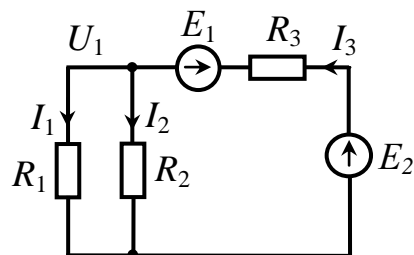
$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \left(\frac{a_0}{2} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n^2}{2} = P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n .$$

Подсчет по формуле дает:

$$P_T = 0,2^2 + 0,8^2/2 + 0,4^2/2 + 0,4^2/2 = 0,52.$$

Ответ. Средняя за период мощность сигнала, выделяемая в сопротивлении 1 Ом равна 0,52 ватт.

Задача 9. На рисунке изображена цепь постоянного тока. Величина ЭДС E_1 равна 5,5 В. Источники имеют нулевое внутреннее сопротивление. Величины сопротивлений $R_1 = 75$ Ом, $R_2 = 120$ Ом, $R_3 = 100$ Ом. Определите величину ЭДС E_2 , если ток через резистор R_1 равен 40 мА.



Решение. Существует несколько вариантов решения задачи. Приведем наиболее простой вариант, где задача решается следующими действиями.

1. Определить потенциал (напряжение U_1): $U_1 = I_1 \cdot R_1 = 0,04 \cdot 75 = 3$ В.
2. Определить ток I_2 : $I_2 = U_1 / R_2 = 3 / 120 = 25$ мА.
3. Определить ток I_3 : $I_3 = I_1 + I_2 = 40 + 25 = 65$ мА.
4. Определить падение напряжение на R_3 : $U_{R3} = I_3 \cdot R_3 = 0,065 \cdot 100 = 6,5$ В.
5. Определить величину ЭДС E_2 : $E_2 = U_1 + E_1 + U_{R3} = 3 + 5,5 + 6,5 = 15$ В.

Ответ. Величина ЭДС E_2 равна 15 В.

Задача 10. Резистор R с номинальным значением 820 Ом является элементом цепи гармонического тока. Мгновенное значение тока через резистор $i(t) = 56 \cos \omega t$, мА. Определите минимальную допустимую мощность рассеивания в ваттах для данного резистора типа МЛТ.

Решение. Исходные данные: $R = 820$ Ом, $I_m = 56$ мА. Мощность P , выделяемая в резисторе, равна:

$$P = \frac{I_m^2}{2} R = \frac{56^2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 820 = 1,286 \text{ Вт.}$$

Допустимая мощность рассеивания в ваттах для резисторов типа МЛТ соответствует ряду: 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 (см. параграф 3.2 [1]).

Следовательно, в данном случае необходим выбор резистора с допустимой мощностью рассеивания 2,0 Вт, превышающей реальную выделяемую мощность 1,286 Вт.

Ответ. Минимальная допустимая мощность рассеивания для данного резистора типа МЛТ равна 2,0 Вт.

Задача 11. На некоторой частоте величины сопротивлений элементов R , L и C в последовательной электрической цепи равны $R = 30$ Ом, $x_L = 40$ Ом, $x_C = 50$ Ом. Определите величину полного сопротивления цепи на частоте, в два раза меньшей.

Решение. Комплексное (полное) сопротивление последовательной электрической R , L и C цепи z , согласно (4.19) [1], равно

$$z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + j (x_L - x_C) = R + j X.$$

Оно включает активную R и реактивную X составляющие, причем

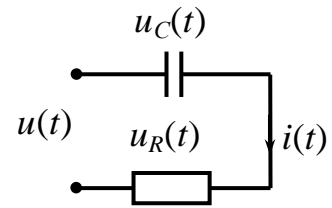
$$X = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

т. е. реактивная составляющая равна разности величин индуктивного и емкостного сопротивлений элементов. При этом величина индуктивного сопротивления $x_L = \omega L$ прямо пропорциональна частоте, а величина емкостного сопротивления $x_C = 1/\omega C$ обратно пропорциональна частоте. Таким образом, если на одной частоте $R = 30$ Ом, $x_L = 40$ Ом, $x_C = 50$ Ом, то на частоте, в два раза меньшей, $R = 30$ Ом, $x_L = 20$ Ом, $x_C = 100$ Ом. Результирующее реактивное сопротивление цепи X равно — 80 Ом. Величина (модуль) z полного сопротивления цепи равна:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{30^2 + 80^2} = 85,4 \text{ Ом.}$$

Ответ. Величина полного сопротивления цепи на частоте, в два раза меньшей, равна 85,4 Ом.

Задача 12. Дана электрическая цепь. Величины элементов в цепи $R = 750 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$, к цепи приложено гармоническое напряжение $u(t) = U_m \cos(\omega t - \psi_u) = 2,5 \cos(10^4 t - 60^\circ)$, В. Определить ток в цепи $i(t)$, напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и на резисторе $u_R(t)$.



Решение. Исходные данные к задаче: $R = 750 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$, $U_m = 2,5 \text{ В}$, $\omega = 10^4$, $\psi_u = 60^\circ$. Задача решается символическим методом следующими шагами. Вначале определим ток в цепи $i(t)$.

1. Гармоническое воздействие заменяется комплексным числом (прямой переход): $u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_u) \div U_m = U_m e^{j\psi_u} = 2,5 e^{-j60^\circ}$.

2. Определяется комплексное (полное) сопротивление последовательной электрической RC цепи z :

$$\begin{aligned} z = z e^{j\varphi_z} &= z_R + z_C = R + \frac{1}{j\omega C} = 750 + \frac{1}{j10^4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 750 - j1000 = 1250 e^{-j53^\circ}. \end{aligned}$$

3. Определяется искомый комплексный ток I_m , а также его модуль I_m и аргумент ψ_i по закону Ома для цепи:

$$I_m = I_m e^{j\psi_i} = \frac{U_m}{z} = \frac{U_m}{z} e^{j(\psi_u - \varphi_z)} = \frac{2,5 e^{-j60^\circ}}{1250 e^{-j53^\circ}} = 2 e^{-j7^\circ} \text{ (мА)}.$$

4. Выражение искомого тока $i(t)$ в форме действительной гармонической функции (обратный переход):

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \psi_i) = 2 \cos(10^4 t - 7^\circ), \text{ мА}.$$

Затем определяются комплексные напряжения на элементах цепи U_{mC} и U_{mR} . По закону Ома для элементов цепи C и R :

$$U_{mC} = I_m z_C = I_m \frac{1}{j\omega C} = 2 \cdot 10^{-3} e^{-j7^\circ} \cdot 1000 e^{-j90^\circ} = 2 e^{-j97^\circ} \text{ (В)},$$

$$U_{mR} = I_m z_R = I_m R = 2 \cdot 10^{-3} e^{-j7^\circ} \cdot 750 = 1,5 e^{-j7^\circ} \text{ (В)}.$$

Соответствующие мгновенные значения напряжений на конденсаторе и резисторе получаются путем обратного перехода от полученных комплексных напряжений:

$$u_C(t) = U_{mC} \cos(\omega t + \psi_i - \pi/2) = 2 \cos(10^4 t - 97^\circ), \text{ В};$$

$$u_R(t) = U_{mR} \cos(\omega t + \psi_i) = 1,5 \cos(10^4 t - 7^\circ), \text{ В}.$$

Ответ. Ток в цепи $i(t)$, напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и на резисторе $u_R(t)$ соответственно равны: $2 \cos(10^4 t - 7^\circ)$, мА; $2 \cos(10^4 t - 97^\circ)$, В; $1,5 \cos(10^4 t - 7^\circ)$, В.

Задача 13. На рисунке обозначены величины сопротивлений элементов цепи на некоторой частоте. Определите величину полного сопротивления цепи.

Решение. Исходные данные к задаче: $x_L = 15 \text{ Ом}$, $R = 30 \text{ Ом}$. Элементы цепи соединены параллельно.

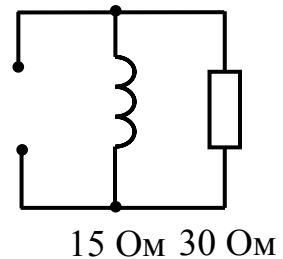
Следовательно, комплексное (полное) сопротивление параллельной электрической RL цепи z равно:

$$z = \frac{z_R \cdot z_L}{z_R + z_L} = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{30 \cdot j15}{30 + j15}.$$

Величина полного сопротивления цепи z равна модулю этой дроби:

$$z = \frac{30 \cdot 15}{\sqrt{30^2 + 15^2}} = 13,4 \text{ Ом}.$$

Ответ. Величина полного сопротивления цепи z равна 13,4 Ом.

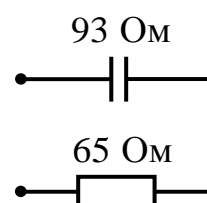


Задача 14. Катушка индуктивности L и резистор R соединены последовательно, через них протекает гармонический ток частотой f . На этой частоте сопротивление резистора и реактивное сопротивление катушки одинаковы. Как изменится величина полного сопротивления цепи, если частота тока увеличилась в 2,5 раза?

Решение. Комплексное (полное) сопротивление последовательной электрической RL цепи z на частоте f равно: $z = R + j\omega L$. Величина полного сопротивления цепи $z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Поскольку по условию задачи на частоте f величины: сопротивление резистора R и реактивное сопротивление катушки ωL одинаковы, можно сделать обозначение $A = R = \omega L$ и записать $z_1 = A\sqrt{2}$. Аналогично, на частоте $2,5f$ величина полного сопротивления цепи $z_2 = A\sqrt{1+2,5^2} = A \cdot 2,7$. Сопоставление сопротивлений z_1 и z_2 дает ответ: $z_2/z_1 = \sqrt{1+2,5^2}/\sqrt{2} = 1,9$.

Ответ. На частоте, в 2,5 раза большей, величина полного сопротивления цепи z увеличилась в 1,9 раза.

Задача 15. На рисунке обозначены величины сопротивлений элементов цепи на некоторой частоте. Определите величину полного сопротивления цепи.



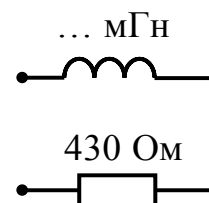
Решение. Комплексное (полное) сопротивление последовательной электрической RC -цепи z на частоте f равно:

$$z = R + \frac{1}{j\omega C} = 65 - j93.$$

Величина полного сопротивления цепи $z = \sqrt{65^2 + 93^2} = 113,5$ Ом.

Ответ. Величина полного сопротивления цепи z равна 113,5 Ом.

Задача 16. На рисунке показана последовательная цепь, работающая на частоте $f = 6$ кГц. Величина резистора $R = 430$ Ом. Определите величину индуктивности катушки L в миллигенри, если величина полного сопротивления цепи равна 580 Ом.



Решение. Исходные данные к задаче: $f = 6$ кГц, $z = 580$ Ом, $R = 430$ Ом. Комплексное (полное) сопротивление последовательной электрической RL цепи z равно:

$$z = R + j 2\pi f L = z e^{j\varphi_z}.$$

Подставляя численные данные, имеем:

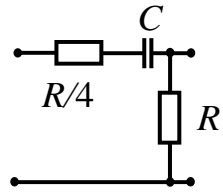
$$z = 580 = \sqrt{430^2 + (2\pi \cdot 6 \cdot 10^3 L)^2},$$

откуда находим

$$L = \sqrt{\frac{580^2 - 430^2}{(2\pi \cdot 6 \cdot 10^3)^2}} = 0,01 \text{ Гн} = 10 \text{ мГн}.$$

Ответ. Величина индуктивности катушки L равна 10 миллигенри.

Задача 17. Определите величину входного сопротивления цепи $z_{\text{вх}}$ при значении $\omega\tau = 2$ ($\tau = RC$ — постоянная времени цепи).



Решение. Входное сопротивление цепи $z_{\text{вх}}$ равно:

$$z_{\text{вх}} = \frac{R}{4} + \frac{1}{j\omega C} + R = \frac{j\omega RC + 4 + 4j\omega RC}{4j\omega C} = R \left(\frac{4 + 5j\omega\tau}{4j\omega\tau} \right).$$

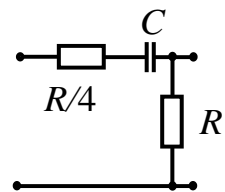
Модуль (величина)

$$z_{\text{вх}} = R \frac{\sqrt{16 + 25(\omega\tau)^2}}{4\omega\tau}.$$

При $\omega\tau = 2$ величина $z_{\text{вх}} = 1,35 R$.

Ответ. Величина входного сопротивления цепи $z_{\text{вх}}$ при значении $\omega\tau = 2$ равна $1,35 R$.

Задача 19. Определите величину передаточной функции цепи по напряжению K_U при значении $\omega\tau = 2$ ($\tau = RC$ — постоянная времени цепи).



Решение. Комплексная передаточная функция (КПФ) цепи по напряжению для Г-образной цепи определяется как отношение выходного и входного сопротивлений цепи:

$$K(\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = \frac{z_{\text{ВЫХ}}}{z_{\text{ВХ}}}.$$

Входное сопротивление для данной цепи было найдено при решении задачи 17:

$$z_{\text{ВХ}} = R \left(\frac{4 + 5j\omega\tau}{4j\omega\tau} \right).$$

Выходное сопротивление для данной цепи $z_{\text{ВЫХ}} = R$. Следовательно,

$$K(\omega) = \frac{4j\omega\tau}{4 + 5j\omega\tau}.$$

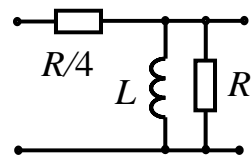
Модуль (величина) (КПФ)

$$K(\omega) = \frac{4\omega\tau}{\sqrt{16 + 25(\omega\tau)^2}}.$$

При $\omega\tau = 2$: $K(\omega) = 0,74$.

Ответ. Величина передаточной функции цепи по напряжению K_U при значении $\omega\tau = 2$ равна 0,74.

Задача 20. Определите величину передаточной функции цепи по напряжению K_U при значении $\omega\tau = 1,5$ ($\tau = L/R$ — постоянная времени цепи).



Решение. Комплексная передаточная функция (КПФ) цепи по напряжению для Г-образной цепи определяется как отношение выходного и входного сопротивлений цепи:

$$K(\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = \frac{z_{\text{ВЫХ}}}{z_{\text{ВХ}}}.$$

Входное сопротивление для данной цепи:

$$z_{\text{BX}} = \frac{R}{4} + \frac{j\omega LR}{R + j\omega L} = \frac{R^2 + 5j\omega LR}{4(R + j\omega L)}.$$

Выходное сопротивление

$$z_{\text{ВЫХ}} = \frac{j\omega LR}{R + j\omega L}.$$

Следовательно,

$$K(\omega) = \frac{z_{\text{ВЫХ}}}{z_{\text{BX}}} = \frac{4j\omega LR}{R^2 + 5j\omega LR} = \frac{4j\omega\tau}{1 + 5j\omega\tau}.$$

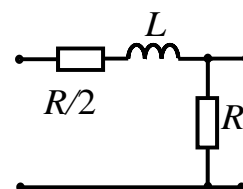
Модуль (величина) (КПФ)

$$K(\omega) = \frac{4\omega\tau}{\sqrt{1 + 25(\omega\tau)^2}}.$$

При $\omega\tau = 1,5$: $K(\omega) = 0,79$.

Ответ. Величина передаточной функции цепи по напряжению K_U при значении $\omega\tau = 1,5$ равна 0,79.

Задача 21. Назовите значения переходной характеристики данной цепи $h(t)$ для двух точек на временной оси: при нулевом времени — $h(0)$ и при бесконечно большом времени — $h(\infty)$.



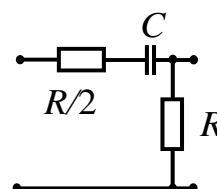
Решение. Переходная характеристика цепи $h(t)$ есть реакция цепи на единичный скачек $\sigma(t)$ напряжения или тока. Катушка индуктивности удовлетворяет закону коммутации, в соответствии с которым мгновенные изменения величины тока через нее невозможны. Это проявляется в том, что ток через катушку индуктивности в момент перед приложением скачка $i_L(0_-)$ и через мгновение, в момент скачка $i_L(0)$, не изменяется: $i_L(0_-) = i_L(0)$. Следовательно, если $i_L(0_-) = 0$, то и $i_L(0) = 0$, то есть в момент скачка катушка индуктивности представляет собой бесконечно большое сопротивление (разрыв цепи), поэтому $h(0) = 0$.

При бесконечно большом времени скачок подобен постоянному напряжению, приложенному к цепи. Катушка индуктивности при этом представляет собой нулевое сопротивление, и величина $h(\infty)$ численно равна коэффициенту передачи делителя напряжения $R/2 - R$:

$$h(\infty) = \frac{R}{\frac{R}{2} + R} = \frac{2}{3} = 0,67.$$

Ответ. Значение переходной характеристики данной цепи $h(t)$ при нулевом времени $h(0) = 0$, а при бесконечно большом времени $h(\infty) = 0,67$.

Задача 22. Назовите значения амплитудно-частотной характеристики данной цепи $K(\omega)$ для двух точек на частотной оси: на нулевой частоте — $K(0)$ и на бесконечно большой частоте — $K(\infty)$.



Решение. Ответ на вопрос не требует вывода выражения передаточной характеристики цепи и дается на основании частотных свойств элементов цепи. На нулевой частоте (постоянный ток) сопротивление конденсатора бесконечно, цепь разорвана и $K(0) = 0$. На бесконечно большой частоте сопротивление конденсатора равно нулю и коэффициент передачи цепи определен делителем напряжения $R/2 - R$:

$$K(\infty) = \frac{R}{\frac{R}{2} + R} = \frac{2}{3} = 0,67.$$

Ответ. Значение амплитудно-частотной характеристики данной цепи на нулевой частоте $K(0) = 0$, на бесконечно большой частоте $K(\infty) = 0,67$.

Задача 23. В симметричной трехфазной цепи «звезда-звезда» амплитуда тока линии $I_{мл}$ равна 30 А. Определите величину действующего значения линейного напряжения $U_{л}$ в вольтах, если комплексное сопротивление одной фазы нагрузки $Z_{н} = 9(1 + 2j)$, Ом.

Решение. В симметричной трехфазной цепи «звезда-звезда» действующие значения токов линий $I_{\text{л}}$ и токов фаз $I_{\text{ф}}$ совпадают: $I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}$. Действующие значения линейных напряжений $U_{\text{л}}$ и фазных напряжений $U_{\text{ф}}$ соотносятся как $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$.

Определим величину действующего значения фазного напряжения

$$U_{\text{ф}} = I_{\text{ф}} \cdot Z_{\text{н}} = \frac{I_{\text{мл}}}{\sqrt{2}} \cdot Z_{\text{н}} = \frac{30}{\sqrt{2}} \cdot 20,1 = 426 \text{ В},$$

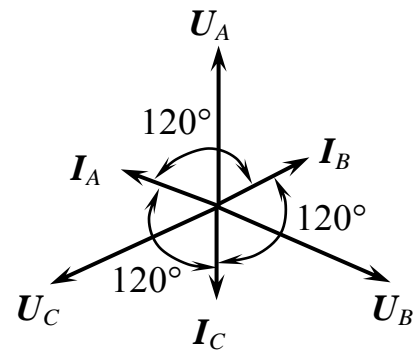
здесь $Z_{\text{н}}$ — модуль (величина) сопротивления нагрузки фазы:

$$Z_{\text{н}} = 9\sqrt{5} = 20,1 \text{ Ом}.$$

$$\text{Итак, } U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} = \sqrt{3} \cdot 426 = 738 \text{ В}.$$

Ответ. Величина действующего значения линейного напряжения $U_{\text{л}}$ равна 738 вольт.

Задача 24. На векторной диаграмме показаны векторы фазных токов (I_A, I_B, I_C) и напряжений (U_A, U_B, U_C) в симметричной трехфазной цепи «звезда-звезда». Какой нагрузке соответствует векторная диаграмма?



Решение. Нагрузки в фазах симметричной трехфазной цепи «звезда-звезда» имеют резистивно-емкостной характер, так как векторы токов фаз опережают векторы соответствующих фазных напряжений на угол менее 90° .

Ответ. Векторная диаграмма соответствует резистивно-емкостному характеру нагрузки.

Задача 25. В симметричной трехфазной цепи «звезда-звезда» действующее значение тока линии $I_{\text{л}}$ равно 135 А, действующее значение линейного напряжения $U_{\text{л}}$ равно 220 В. Активная мощность в ваттах P , по-

требуемая трехфазной нагрузкой, равна 45 кВт. Определите «косинус фи» нагрузки.

Решение. Активная мощность, потребляемая трехфазной нагрузкой, равна

$$P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi,$$

где угол φ — сдвиг фазы между током I_{Φ} через нагрузку и напряжением U_{Φ} на нагрузке.

Поскольку для трехфазной цепи «звезда-звезда»

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \text{ а } I_{\Phi} = I_{\text{л}}, \cos \varphi = \frac{\sqrt{3} P}{3 \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}}} = \frac{45 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 135} = 0,875.$$

Ответ. «Косинус фи» нагрузки равен 0,875.

Задача 26. В симметричной трехфазной цепи «звезда-треугольник» действующее значение тока линии равно 53 А. Величина полной мощности S , потребляемая трехфазной резистивной нагрузкой, равна 17 кВт. Определите амплитуду линейного напряжения в вольтах.

Решение. Полная мощность S , потребляемая трехфазной резистивной нагрузкой, является активной мощностью

$$S = P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

Поскольку для трехфазной цепи «звезда-треугольник»

$$I_{\Phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}},$$

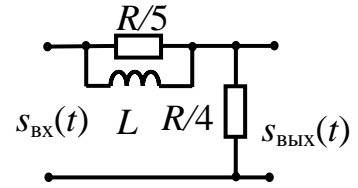
а $U_{\Phi} = U_{\text{л}}$, действующее значение фазного напряжения равно

$$U_{\Phi} = \frac{\sqrt{3} S}{3 \cdot I_{\text{л}}} = \frac{17000}{\sqrt{3} \cdot 53} = 185,2 \text{ В.}$$

Амплитуда линейного напряжения $U_{\text{мл}}$ равна $\sqrt{2} \cdot 185,2 = 262 \text{ В}$.

Ответ. Амплитуда линейного напряжения равна 262 Вольт.

Задача 27. Найдите выражение изображения по Лапласу импульсной характеристики цепи $G(p)$ ($\tau = L/R$).



Решение. Напоминаем операторные сопротивления элементов цепи:

$$z_R(p) = R, \quad z_C(p) = \frac{1}{pC}, \quad z_L(p) = pL.$$

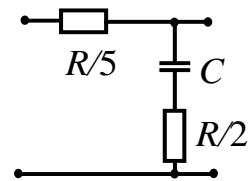
Известно также, что изображение по Лапласу импульсной характеристики цепи $G(p)$ совпадает с операторным выражением передаточной функции цепи $K(p)$. Для данной цепи

$$K(p) = \frac{z_{\text{ВЫХ}}(p)}{z_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{R}{4 \left(\frac{\frac{R}{5} pL}{\frac{R}{5} + pL} + \frac{R}{4} \right)} = \frac{1 + 5 p\tau}{1 + 9 p\tau}.$$

Ответ. Изображение по Лапласу импульсной характеристики цепи

$$G(p) = \frac{1 + 5 p\tau}{1 + 9 p\tau}.$$

Задача 28. На вход четырехполюсника поступает экспоненциальный импульс $s_{\text{ВХ}}(t) = U_0 e^{-2\alpha t} \cdot 1(t)$. Определите изображение по Лапласу отклика цепи $S_{\text{ВЫХ}}(p)$ ($\tau = RC$).



Решение. Изображение отклика цепи

$$S_{\text{ВЫХ}}(p) = S_{\text{ВХ}}(p) \cdot K(p).$$

Найдем изображение воздействия

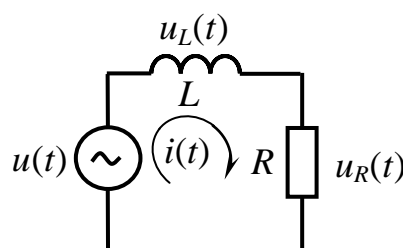
$$S_{\text{ВХ}}(p) = L\{s_{\text{ВХ}}(t)\} = \int_0^{\infty} U_0 e^{-2\alpha t} e^{-pt} dt = \frac{U_0}{p + 2\alpha}.$$

Определим операторное выражение передаточной функции цепи

$$K(p) = \frac{z_{\text{вых}}(p)}{z_{\text{вх}}(p)} = \frac{\frac{R}{2} + \frac{1}{pC}}{\frac{R}{5} + \frac{R}{2} + \frac{1}{pC}} = \frac{10 + 5p\tau}{10 + 7p\tau}.$$

Ответ. Изображение по Лапласу отклика цепи $S_{\text{вых}}(p)$ равно $\frac{U_0}{p+2\alpha} \cdot \frac{10+5p\tau}{10+7p\tau}$.

Задача 29. Дана последовательная RL -цепь, питаемая гармоническим напряжением $u(t) = U_m \cos \omega t$, $U_m = 70$ В, $R = 150$ Ом, $L = 90$ мГн, $\omega = 2000$ рад/с. Определите величины полной (ВА), активной (Вт) и реактивной мощностей (ВАР) в данной цепи.



Решение. Исходные данные к задаче: $U_m = 70$ В, $R = 150$ Ом, $L = 90$ мГн, $\omega = 2000$ рад/с. Вначале определим величину полного сопротивления последовательной цепи z :

$$\begin{aligned} z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = \\ &= \sqrt{150^2 + (2 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-3})^2} = 234 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

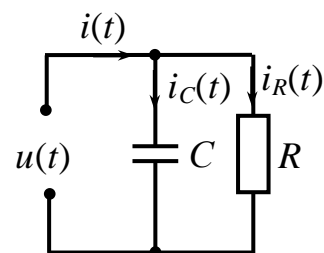
Далее находим величину действующего значения тока в цепи I :

$$I = \frac{U_m}{\sqrt{2} z} = \frac{100}{\sqrt{2} \cdot 234} = 0,3 \text{ А.}$$

Наконец, рассчитываем мощности: величина полной мощности в данной цепи $S = I^2 z = 0,3^2 \cdot 234 = 21$ ВА, величина активной мощности в данной цепи $P = I^2 R = 0,3^2 \cdot 150 = 13,5$ Вт, величина реактивной мощности в данной цепи $Q = I^2 X_L = 0,3^2 \cdot 180 = 16,2$ ВАР.

Ответ. $S = 21$ ВА, $P = 13,5$ Вт, $Q = 16,2$ ВАР.

Задача 30. Дана параллельная RC -цепь, питаемая гармоническим напряжением $u(t) = U_m \cos \omega t$, $U_m = 70$ В, $R = 150$ Ом, $L = 90$ мГн, $\omega = 2000$ рад/с. Определите величины полной (ВА), активной (Вт) и реактивной мощностей (ВАР) в данной цепи.



Решение. Исходные данные к задаче: $U_m = 70$ В, $R = 150$ Ом, $C = 5$ мкФ, $\omega = 2000$ рад/с. Поскольку цепь параллельная, задача решается просто. Величина активной мощности в данной цепи

$$P = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{70^2}{2 \cdot 150} = 16,3 \text{ Вт},$$

величина реактивной мощности в данной цепи

$$Q = \frac{U_m^2}{2X_C} = \frac{U_m^2 \omega C}{2} = \frac{70^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2} = 24,5 \text{ ВАР},$$

величина полной мощности в данной цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{16,3^2 + 24,5^2} = 29,4 \text{ ВА}.$$

Ответ. $S = 29,4$ ВА, $P = 16,3$ Вт, $Q = 24,5$ ВАР.

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ СВОЙСТВ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ»

Целью работы является изучение частотных и временных свойств линейных цепей. При этом прогнозируются и рассчитываются все характеристики заданной цепи, затем выполняется опытная (компьютерная) проверка. Сравниваются расчетные и опытные данные. Важной составляющей работы является осмысление физической сути происходящих в цепи явлений.

Сведения из теории, касающиеся вопроса, приведены в главах 5 и 7 учебного пособия [1]. Лабораторная работа включает два задания.

Задание 1. Изучение трехэлементной линейной цепи.

Структура цепи показана на рис. 3.1, элементы схемы содержит таблица 3.1.

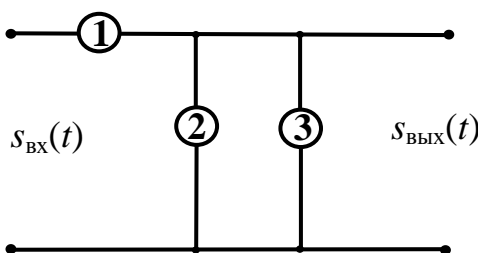


Рис. 3.1 — Структура трехэлементной линейной цепи

Таблица 3.1 — Варианты индивидуальных заданий

Элементы цепи	Индивидуальные варианты задания № 1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C	C	C	$2C$	$2C$	$3C$	C	C	$2C$	$3C$
2	R	R	R	R	$2R$	R	$2R$	$2R$	$2R$	$2R$
3	L	$2L$	$3L$	L	$3L$	$2L$	$2L$	L	L	$2L$

Элементы цепи	Индивидуальные варианты задания № 1									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	L	$2L$	$3C$	L	L	$2L$	$3L$	L	$2C$	$2L$
2	R	R	$2R$	R	R	$2R$	$2R$	$2R$	$2R$	$2R$
3	C	C	L	$2C$	$3C$	C	C	C	$2L$	$2C$

Задание 2. Изучение четырехэлементной линейной цепи.

Структура цепи показана на рис. 3.2, элементы схемы содержит таблица 3.2.

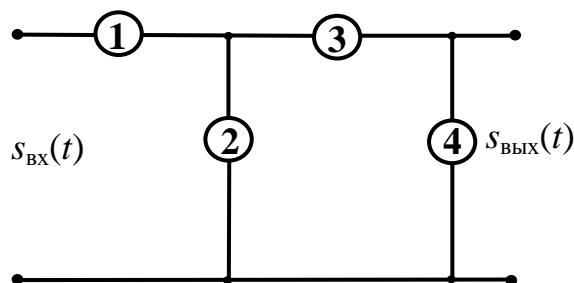


Рис. 3.2 — Структура четырехэлементной линейной цепи

Таблица 3.2 — Варианты индивидуальных заданий

Элементы цепи	Индивидуальные варианты задания № 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	L	$2C$	R	L	C	C	C	L	$2C$	R
2	R	$2R$	$2C$	R	R	R	$2R$	$2R$	R	C
3	C	L	L	$2C$	R	$2L$	R	$2C$	L	$2L$
4	$2R$	R	$2R$	R	$2L$	$2R$	$2L$	R	$2R$	$2R$

Элементы цепи	Индивидуальные варианты задания № 2									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	C	C	L	L	$2C$	C	$2C$	$2L$	L	C
2	R	R	R	$2R$	$2R$	$2R$	R	$2R$	$2R$	R
3	L	R	C	R	R	$2L$	R	R	C	L
4	R	L	R	C	L	R	L	C	R	$2R$

Содержание лабораторной работы (общее для заданий 1 и 2)

1. Сделать общий прогноз частотных и временных свойств заданной цепи, основываясь на структуре схемы и ее элементах.

2. Определить комплексную передаточную функцию цепи, найти ее модуль (АЧХ) и аргумент (ФЧХ).

3. Не выполняя строгий анализ полученных математических выражений, попытаться сделать на их основе качественные и количественные оценки поведения АЧХ и ФЧХ цепи (начальное и конечное значения, монотонные, с экстремумом, с разрывом и проч.).

4. Задавшись численными значениями элементов цепи ($R = 1$ кОм, $C = 1$ нФ, $L = 1$ мГн), рассчитать резонансную частоту f_R , «базовую» частоту f_B и ряд значений модуля и аргумента передаточной функции цепи на кратных частотах nf_B (до 3—4). Для некоторых цепей из банка заданий несложно определить координаты экстремума функции АЧХ. В таком случае этот расчет необходимо привести.

5. Выполнить моделирование частотных свойств заданной цепи в пакете MicroCap 11 [7]. Для этого необходимо снять кривые АЧХ и ФЧХ заданной цепи. На полученные графики АЧХ и ФЧХ цепи нанести характерные координатные метки в точках f_R и кратных частот f_B . Если кривая АЧХ имеет экстремум, нанести его координатную метку.

6. Сравнить данные расчетов и прогнозов по п.1, п.3 и п.4 с опытными данными п.5.

7. Снять переходную характеристику (ПХ) заданной цепи в пакете MicroCap 11. Сделать заключение относительно выполнения предельных соотношений между АЧХ и ПХ.

8. Сделать итоговое заключение по работе.

Задание 1. Пример выполнения лабораторной работы и методические указания по пунктам содержания работы.

Пусть задана трехэлементная цепь рис. 3.3 и ее элементы. При численных оценках и расчетах величины элементов цепи приняты равными

$R = 1$ кОм, $C = 1$ нФ, $L = 1$ мГн. Те же величины элементов приняты при моделировании цепи.

Далее по пунктам содержания работы излагается текст отчета. Попутно приводятся необходимые методические указания.

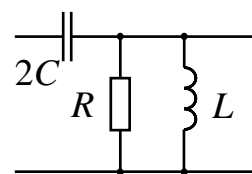


Рис. 3.3 — Пример трехэлементной цепи

1. Данная цепь является цепью второго порядка. Наличие конденсатора на входе говорит о том, что АЧХ цепи начинается с нуля. Конечное значение АЧХ равно единице (индуктивность на выходе цепи). Поскольку в цепи присутствуют две реактивности противоположного характера, в ней возможны резонансные явления, поэтому кривая АЧХ может содержать экстремум на некоторой частоте.

Значение ФЧХ цепи при нулевой частоте равно 180° . Физически это можно объяснить так. На самой низкой частоте входное напряжение вызывает через конденсатор ток, опережающий его на 90° . Этот ток создает на индуктивности выходное напряжение, в свою очередь опережающее его на 90° . В итоге сдвиг фаз между выходом и входом цепи равен 180° . При бесконечной частоте сдвиг фаз равен нулю, поскольку цепь вырождается в единственный резистор R и вход цепи отождествляется с выходом.

Что касается поведения цепи во временной области, возможный колебательный процесс в цепи будет затухающим, поскольку резистор R вносит потери в колебательную систему. Переходная характеристика (ПХ) в начальный момент времени равна 1. Об этом ясно говорит структура цепи рис. 3.3. Конечное значение ПХ также не вызывает сомнения — это 0.

2. Для определения комплексной передаточной функции цепи заменим элементы цепи комплексными сопротивлениями Z_1 , Z_2 , Z_3 (рис. 3.4, а) и определим эквивалент Z параллельного соединения Z_2 и Z_3 :

$$Z = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}.$$

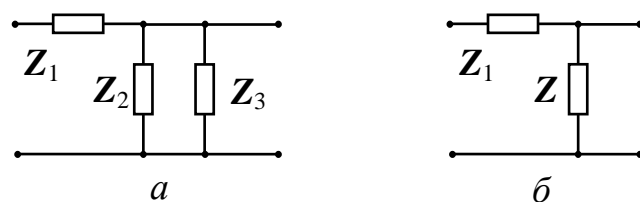


Рис. 3.4 — К расчету КПФ:

a — замена элементов комплексными сопротивлениями,

б — сведение цепи к делителю напряжения

С помощью рис. 3.4, *б* определим комплексную передаточную функцию (КПФ) цепи:

$$K(\omega) = \frac{Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{ВХ}}} = \frac{Z}{Z_1 + Z} = \frac{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}} = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_2 \cdot Z_3}.$$

Подставляя теперь комплексные сопротивления элементов, имеем:

$$K(\omega) = \frac{j\omega LR}{\frac{R}{3j\omega C} + \frac{L}{3C} + j\omega LR} = \frac{j\omega\tau}{\frac{1}{3j\omega\tau} + j\omega\tau + \frac{L}{3CR^2}}. \quad (3.1)$$

В формуле (3.1) постоянная времени цепи τ численно равна

$$\tau = RC = 10^3 \cdot 10^{-9} = L/R = 10^{-3}/10^3 = 10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс},$$

а множитель

$$\frac{L}{CR^2} = \frac{10^{-3}}{10^{-9} \cdot 10^6} = 1.$$

Окончательно для КПФ получаем выражение:

$$K(\omega) = - \frac{3\omega^2\tau^2}{1 - 3\omega^2\tau^2 + j\omega\tau}. \quad (3.2)$$

Определим модуль КПФ (АЧХ)

$$K(\omega) = \frac{3\omega^2\tau^2}{\sqrt{1 - 5\omega^2\tau^2 + 9\omega^4\tau^4}} \quad (3.3)$$

и аргумент КПФ (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = \pi - \arctg \frac{\omega\tau}{1 - 3\omega^2\tau^2}. \quad (3.4)$$

3. Изучение частотных свойств цепи проводится на основании формул (3.2, 3.3, 3.4). За переменную в этих формулах удобно принять безразмерное произведение $\omega\tau$, где величина τ постоянна и равна 10^{-6} с, а ω является текущей частотой.

Рассмотрим формальные свойства выражения АЧХ (3.3). Крайние по частоте значения АЧХ: $K(\omega\tau = 0) = 0$, $K(\omega\tau = \infty) = 1$. Это подтверждает сделанный в п.1 прогноз. Что касается экстремума функции АЧХ (3.3), он возможен, но в рамках лабораторной работы аналитическое исследование функции на экстремум не выполняется. Полная картина поведения АЧХ будет получена при моделировании цепи по п. 5.

Формальные свойства выражения ФЧХ (3.4). Начальное значение $\varphi(\omega\tau)$ при $\omega\tau = 0$ равно 180° , так как второе слагаемое обращается в ноль. Далее поведение ФЧХ определяется особенностью поведения аргумента второго слагаемого. При этом имеется особая точка $1 = 3\omega^2\tau^2$. Вблизи нее при $1 > 3\omega^2\tau^2$ аргумент положителен и близок к $+\infty$, второе слагаемое близко к 90° и $\varphi(\omega\tau) \rightarrow 90^\circ$. Вблизи особой точки, но справа от нее при $1 < 3\omega^2\tau^2$ аргумент становится отрицательным, и теперь $\varphi(\omega\tau)$ следует считать по другой формуле:

$$\varphi(\omega\tau) = \pi - \left(\pi - \arctg \frac{\omega\tau}{|1 - 3\omega^2\tau^2|} \right). \quad (3.5)$$

Из формулы (3.5) следует, что справа от особой точки с ростом частоты ФЧХ от значения 90° стремится к нулю. Приведенный математический анализ поведения ФЧХ подтверждает сделанный в п.1 прогноз. Остается выяснить значение частоты в особой точке, что будет сделано в следующем пункте содержания работы.

4. Резонансная частота f_p определена значениями реактивных элементов цепи $3C$ и L :

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{3LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = 91888 \text{ Гц} \approx 91,9 \text{ кГц.} \quad (3.6)$$

За «базовую» частоту f_b принята частота, соответствующая равенству $\omega t = 1$. Эта частота удобна тем, что позволяет быстро проводить численный расчет по формулам (3.2—3.5).

$$f_b = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = 159155 \text{ Гц} \approx 159 \text{ кГц.} \quad (3.7)$$

Расчетные значения $K(f_p)$ и $\varphi(f_p)$ и $K(nf_b)$ и $\varphi(nf_b)$, выполненные по формулам (3.3—3.5), помещены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 — Численные расчеты АЧХ и ФЧХ

Частота	0	f_p	$0,5 f_b$	f_b	$2 f_b$	$3 f_b$
АЧХ	0	1,73	1,34	1,34	1,074	1,033
ФЧХ	180°	90°	116°	$26,6^\circ$	$10,3^\circ$	$6,7^\circ$

5. Моделирование частотных свойств заданной цепи в пакете MicroCap 11. На рабочем столе пакета собирается схема заданной цепи, рис. 3.5. Источник сигнала V1 выбирается из верхнего меню пакета по пути Component — Analog Primitives — Waveform Sources — Sine Sours. Ему присваивается имя General. Другие его установки по умолчанию. Далее необходимо про-
ставить узлы на схеме рис. 3.5, для чего в нижней строчке верхнего меню нажать кнопку с именем Node Numbers. Открыть окно (рис. 3.6) частотного анализа по пути Analysis — AC. В этом окне необходимо сделать ряд установок.

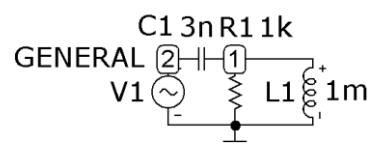


Рис. 3.5 — Схема для моделирования частотных свойств

В окне панорамы частотного анализа Frequency Range выбрать Auto и поставить 1 Meg, 1, что означает начало частотной оси 1 Гц и конец ее 1 МГц. Установить точность расчетов Maximum Change % не менее 1%. В двух нижних строках нажать кнопки второго столбика, чтобы выбрать линейный частотный масштаб взамен логарифмического по умолчанию. Далее, в верхней строке (АЧХ) и в нижней строке (ФЧХ) поставить 1, 2 (при этом АЧХ и ФЧХ будут выведены на разные рисунки), в столбце Y Expression поставить номер выходного узла цепи. Выполнить редакцию V(узел), как показано на рисунке 3.6.

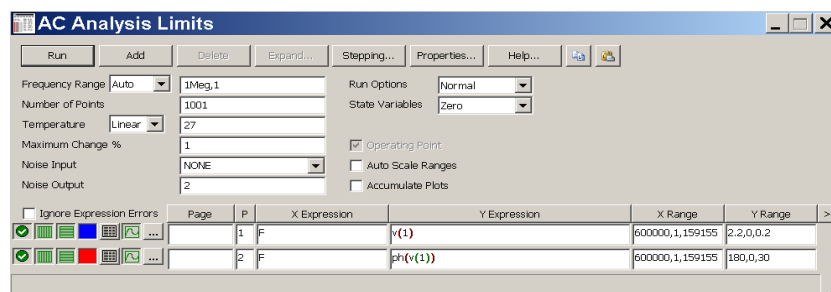


Рис. 3.6 — Установки в окне AC Analysis Limits

В столбце X Range записать пределы работы по частоте. В данном случае это 600000,1,159155. Формат записи цифр без пробелов, разделителем является запятая. Смысл этих цифр следующий: 600000 (или 600к) — верхняя частота, 1 — нижняя частота, 159155 (или приблизительно 159к) — масштабная сетка по частоте. Пределы по частоте одинаковы для АЧХ и ФЧХ.

В столбце Y Range в верхней строке записано: 2.2,0,0.2. Смысл этих цифр: 2.2 — предел АЧХ по вертикали, 0 — нижний предел, 0.2 (.2) — масштабная сетка. В нижней строке столбца Y Range записаны цифры 180,0,30. Это означает верхний предел ФЧХ 180°, нижний — 0°, масштабная сетка через 30°. Установки закончены.

Запускается моделирование (Run), и на рабочий стол выводятся графики АЧХ и ФЧХ, на которых пока нет масштабных меток. Чтобы выста-

вить и закрепить необходимые метки на кривых АЧХ и ФЧХ, нужно поочередно сделать следующее.

Для АЧХ: щелкнуть по кривой, нажать кнопку Score, выбрать Go to X и в клетке Value записать частоту метки (например, базовую 159155 Гц или 159к), затем нажать кнопку Tag Left (Tag Right). В заданной точке кривой появляется метка с двумя координатами — частота и значение АЧХ на этой частоте. Выставить метки на всех характерных частотах. Если нужно поставить метку в точке, где частота неизвестна, например в данном случае для экстремума АЧХ, надо воспользоваться кнопкой Tag Mode в начале списка пиктограмм в нижней строке меню. Крестиком курсора подбирается нужная точка на кривой, и после щелчка появляется метка. Следует отметить некоторую неточность при выполнении этой процедуры: желаемая и фактическая координаты могут немного отличаться. Чтобы убрать любую метку с кривой, надо выделить ее курсором и нажать Delete на клавиатуре.

Для ФЧХ: щелкнуть по кривой и далее следовать описанной выше процедуре. Аналогично можно присваивать точкам кривых координатные метки, пользуясь установками Go to Y по вертикали.

Замечание: для того, чтобы сделать линии кривых более толстыми, надо пройти по пути AC — Limits — Properties — Colors, Fonts, and Lines — Width и выбрать желаемую толщину кривой 2, 3, 4.

На рис. 3.7 показаны АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи с нанесенными масштабными метками.

6. Результаты моделирования цепи в частотной области подтвердили прогнозы и расчеты, приведенные в п. 1, п. 3 и п. 4. Кривая АЧХ действительно имеет экстремум, причем на частоте, отличной от резонансной частоты. Расчетные данные таблицы 3 совпадают с координатами меток, нанесенных на опытные кривые АЧХ и ФЧХ.

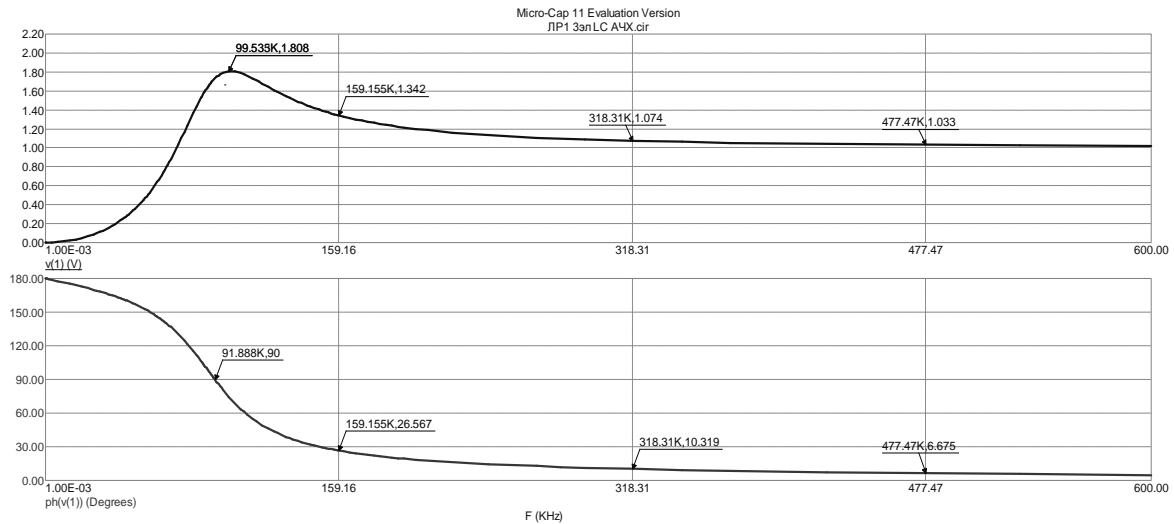


Рис. 3.7 — АЧХ и ФЧХ заданной цепи с нанесенными масштабными метками

7. Во временной области исследуется переходная характеристика (ПХ) — реакция заданной цепи на ступеньку. На рабочем столе пакета собирается схема заданной цепи (рис. 3.8). Источник сигнала V1 Voltage Source выбирается из верхнего меню. В окне выбирается имя источника PWL — Piece Wise Linear type. На рис. 3.9 показаны установки этого источника.

PWL 0,0 10u,0 10u,1

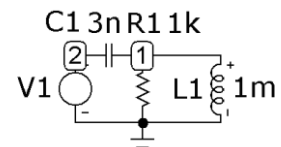


Рис. 3.8 — Схема для моделирования временных свойств

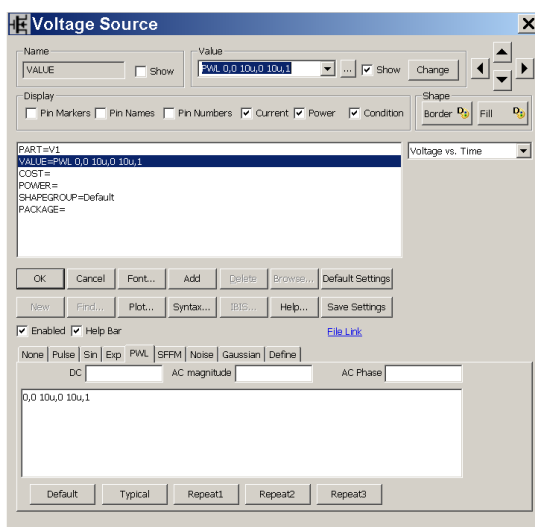


Рис. 3.9 — Установка свойств источника ступеньки V1

Основное здесь — записать файл ступеньки: 0,0 10u,0 10u,1. Первая цифра в 3-х парах данных время, вторая — высота ступеньки. Эта запись соответствует ступеньке высотой 1, начинающейся с задержкой 10 мкс от начала отсчета. Задержка удобна при наблюдении временных процессов в цепи. Можно нажать кнопку Plot и просмотреть сформированную ступеньку. Далее подтверждается «ОК» формат ступеньки.

По пути Analysis — Transient открывается окно установки пределов Transient Analysis Limits (рис. 3.10). Установки уточняются после пробного запуска (Run) и ясны из рисунка.

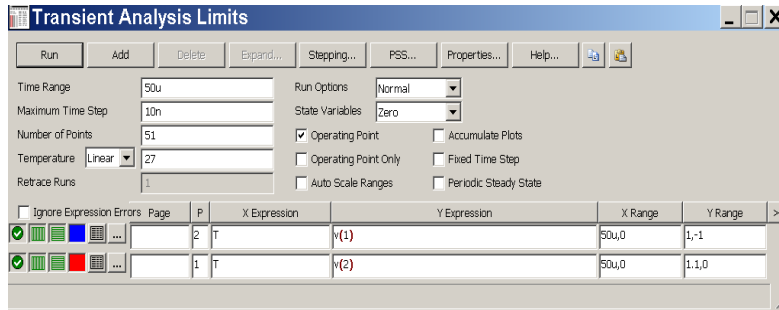


Рис. 3.10 — Установки в окне Transient Analysis Limits

Результат моделирования цепи во временной области показан на рис. 3.11. Как видно, цепь обладает колебательными свойствами, но колебания быстро затухают. Метка периода проставлена с помощью кнопки Horizontal Tag Mode в начале списка пиктограмм в нижней строке меню. Период колебания составляет около 11,01 мкс, что соответствует частоте 90,8 кГц, близкой к частоте резонанса цепи $f_p = 91,9$ кГц. Несовпадение данных на 1% следует объяснить неточностью установки масштабной метки на графике.

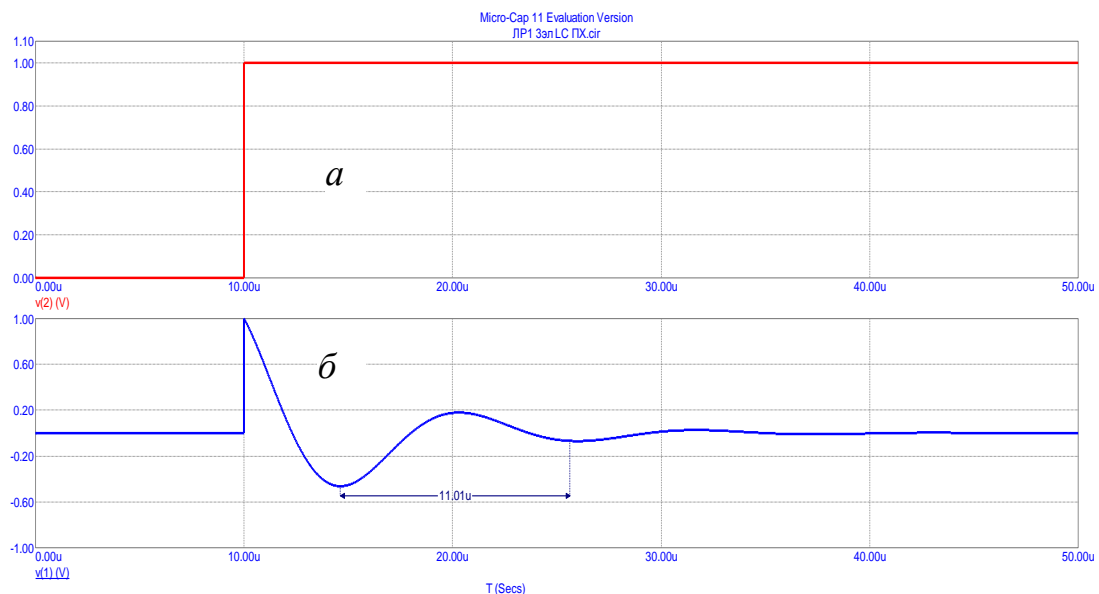


Рис. 3.11 — Ступенька (а) и переходная характеристика цепи исследуемой цепи (б)

Сопоставление графиков рис. 3.7 и рис 3.11 подтверждает предельные соотношения между АЧХ и ПХ: $АЧХ(0) = ПХ(\infty)$ и $АЧХ(\infty) = ПХ(0)$.

Задание 2. Пример выполнения лабораторной работы и методические указания по пунктам содержания работы.

Пусть заданы четырехэлементная цепь (рис. 3.12) и ее элементы. При численных оценках и расчетах величины элементов цепи приняты равными $R = 1$ кОм, $C = 1$ нФ, $L = 1$ мГн. Те же величины элементов приняты при моделировании цепи.

Далее по пунктам содержания работы излагается текст отчета. При рассмотрении этого примера не будут повторяться некоторые пояснения и методические указания, уже изложенные в предыдущем примере.

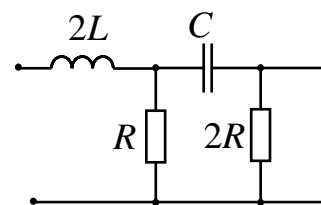


Рис. 3.12 — Пример четырехэлементной цепи

1. Данная цепь является цепью второго порядка. Наличие конденсатора на выходе говорит о том, что АЧХ цепи начинается с нуля. Конечное значение АЧХ равно нулю (индуктивность в последовательном участке цепи). Поскольку в цепи присутствуют две реактивности противоположного характера, в ней возможны резонансные явления, поэтому кривая АЧХ может содержать экстремум на некоторой частоте.

Поведение ФЧХ цепи спрогнозировать сложно. Можно лишь предположить, что цепь такого характера и структуры (наличие L и C в последовательной ветви) имеет поведение ФЧХ колебательного контура, т. е. меняется от 90° до -90° . Опыт позволит проверить эту догадку.

Что касается поведения цепи во временной области, возможный колебательный процесс в цепи будет затухающим, поскольку резисторы вносят потери в колебательную систему. Переходная характеристика (ПХ) в начальный момент времени равна 0 (индуктивность на входе). Конечное значение

ние ПХ также не вызывает сомнения — это 0 (постоянное напряжение тока через конденсатор не вызывает).

2. Для определения комплексной передаточной функции цепи заменим элементы цепи комплексными сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 (рис. 3.13, а) и определим эквивалент сопротивления Z (рис. 3.15, б):

$$Z = \frac{Z_2 \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_2 + Z_3 + Z_4}.$$

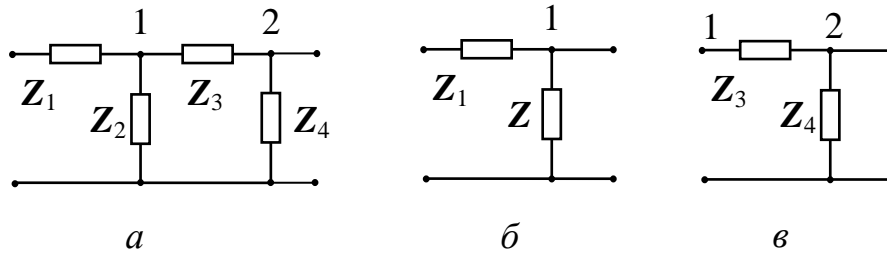


Рис. 3.13 — К расчету КПФ:

- а — замена элементов цепи комплексными сопротивлениями,
 б — к определению передаточной функции $K_1(\omega)$
 в — к определению передаточной функции $K_{12}(\omega)$

С помощью рис. 3.13, б определим комплексную передаточную функцию в узел 1 $K_1(\omega)$:

$$\begin{aligned} K_1(\omega) &= \frac{Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{ВХ}}} = \frac{Z}{Z_1 + Z} = \frac{\frac{Z_2 \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_2 + Z_3 + Z_4}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_2 + Z_3 + Z_4}} = \\ &= \frac{Z_2 \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4}. \end{aligned}$$

Передаточная функция $K_{12}(\omega)$ из узла 1 в узел 2 равна (рис. 3.13, в)

$$K_{12}(\omega) = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4}.$$

В итоге КПФ цепи $K(\omega)$ равна произведению промежуточных передаточных функций $K_1(\omega) \cdot K_{12}(\omega)$:

$$K(\omega) = \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4}. \quad (3.8)$$

Подставляя теперь комплексные сопротивления элементов, имеем:

$$\begin{aligned} K(\omega) &= \frac{2R^2}{2j\omega LR + \frac{2j\omega L}{j\omega C} + 4j\omega LR + \frac{R}{j\omega C} + 2R^2} = \\ &= \frac{1}{j\omega\tau + \frac{L}{CR^2} + 2j\omega\tau + \frac{1}{2j\omega\tau} + 1}. \end{aligned}$$

Учитывая, как и раньше численные данные $\tau = RC = 10^3 \cdot 10^{-9} = L/R = 10^{-3}/10^3 = 10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс}$, а множитель $\frac{L}{CR^2} = \frac{10^{-3}}{10^{-9} \cdot 10^6} = 1$, окончательно для КПФ получаем выражение:

$$K(\omega) = \frac{2j\omega\tau}{(1 - 6\omega^2\tau^2) + 4j\omega\tau}. \quad (3.9)$$

Определим модуль КПФ (АЧХ)

$$K(\omega) = \frac{2\omega\tau}{\sqrt{1 + 4\omega^2\tau^2 + 36\omega^4\tau^4}} \quad (3.10)$$

и аргумент КПФ (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = 90^\circ - \arctg \frac{4\omega\tau}{1 - 6\omega^2\tau^2}. \quad (3.11)$$

3. Изучение частотных свойств цепи проводится на основании формул (3.9, 3.10, 3.11, 3.13). За переменную в этих формулах принято безразмерное произведение $\omega\tau$, где величина τ постоянна и равна 10^{-6} с , а ω является текущей частотой.

Формальные свойства выражения АЧХ (3.10). Крайние по частоте значения АЧХ: $K(\omega\tau = 0) = 0$, $K(\omega\tau = \infty) = 0$. Это подтверждает сделанный в п. 1 прогноз. Экстремум АЧХ имеет место на частоте $f_{\text{макс}}$, определяемой из выражения КПФ (3.9):

$$1 - 6\omega^2\tau^2 = 0.$$

Эта частота равна

$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}\tau} = \frac{10^6}{2\pi\sqrt{6}} = 64975 \text{ Гц} \approx 65 \text{ кГц}. \quad (3.12)$$

При этом высота АЧХ достигает значения 0,5.

Формальные свойства выражения ФЧХ (3.11). Начальное значение $\varphi(\omega\tau)$ при $\omega\tau = 0$ равно 90° , так как второе слагаемое обращается в ноль. Далее поведение ФЧХ определяется особенностью поведения аргумента второго слагаемого. При этом имеется особая точка $1 = 6\omega^2\tau^2$. Вблизи нее при $1 > 6\omega^2\tau^2$ аргумент положителен и близок к $+\infty$, второе слагаемое близко к 90° и $\varphi(\omega\tau) \rightarrow 0^\circ$. Вблизи особой точки, но справа от нее при $1 < 6\omega^2\tau^2$ аргумент становится отрицательным и теперь $\varphi(\omega\tau)$ следует считать по другой формуле:

$$\varphi(\omega\tau) = 90^\circ - \left(\pi - \arctg \frac{4\omega\tau}{|1 - 6\omega^2\tau^2|} \right). \quad (3.13)$$

Из формулы (3.13) следует, что справа от особой точки с ростом частоты ФЧХ от значения 0° стремится к -90° .

4. Резонансная частота f_R определена значениями реактивных элементов цепи C и $2L$:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{2LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = 112539 \text{ Гц} \approx 112,5 \text{ кГц}. \quad (3.14)$$

«Базовая» частота f_B остается прежней:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-9}}} = 159155 \text{ Гц} \approx 159 \text{ кГц}. \quad (3.15)$$

Расчетные значения $K(f_{\text{макс}})$ и $\varphi(f_{\text{макс}})$ и $K(nf_B)$ и $\varphi(nf_B)$, выполненные по формулам (3.10, 3.13), помещены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 — Численные расчеты АЧХ и ФЧХ

Частота	0	$f_{\text{макс}}$	f_P	f_B	$2f_B$	$3f_B$
АЧХ	0	0,5	0,408	0,312	0,164	0,11
ФЧХ	90°	0°	-35,1°	-51,3°	-70,7°	-77,2°

5. Моделирование частотных свойств заданной цепи в пакете MicroCap 11. На рабочем столе пакета собрать схему заданной цепи (рис. 3.14, а). Открыть окно (рис. 3.14, б) частотного анализа и сделать ряд установок, видных на рисунке. Процедура и смысл этих установок были описаны ранее.

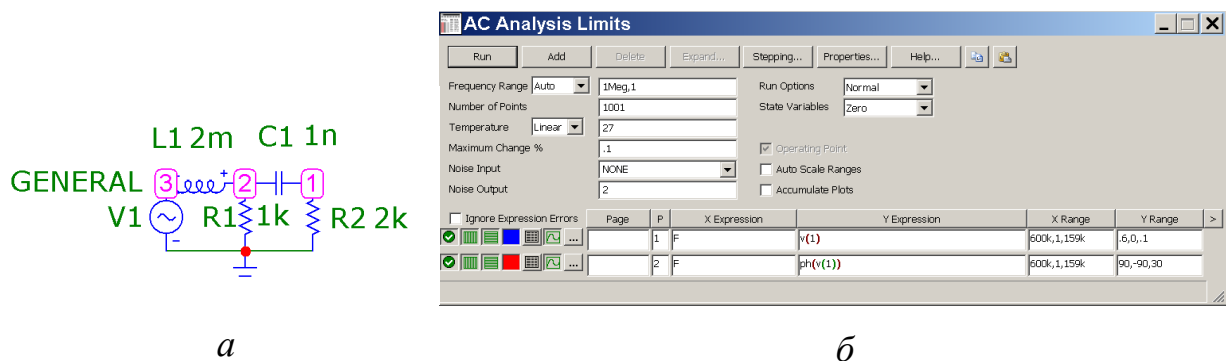


Рис. 3.14 — Моделирования в частотной области:

а — схема для моделирования, б — установки в окне AC Analysis Limits

Запустить моделирование и вывести на рабочий стол графики АЧХ и ФЧХ, на которых пока нет масштабных меток. Выставить и закрепить необходимые метки на всех характерных частотах, как было описано ранее. Результат моделирования показан на рис. 3.15.

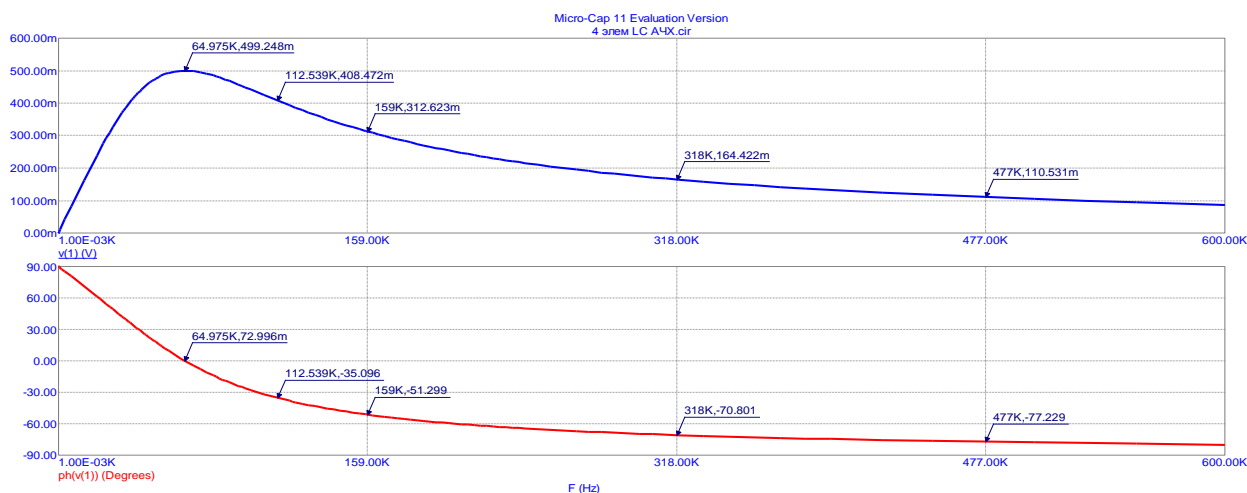
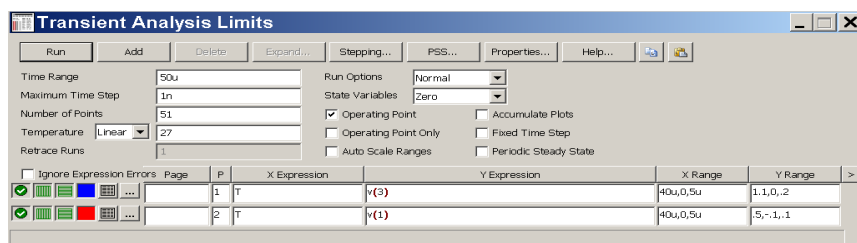
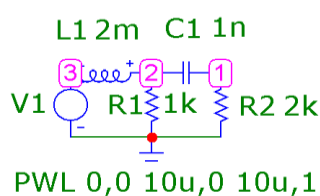


Рис. 3.15 — АЧХ и ФЧХ заданной цепи с нанесенными масштабными метками

6. Результаты моделирования цепи в частотной области подтвердили прогнозы и расчеты, приведенные в п. 1, п. 3 и п. 4. Кривая АЧХ имеет экстремум на частоте $f_{\text{макс}} = 65$ кГц, отличной от резонансной частоты $f_p = 112,5$ кГц. Такое противоречие может быть пояснено крайне слабыми резонансными свойствами данной цепи. Моделирование во временной области способно подтвердить эту догадку. Расчетные данные таблицы 3.4 совпадают с координатами меток, нанесенных на опытные кривые АЧХ и ФЧХ, что говорит о верности расчетных соотношений (3.9, 3.10, 3.11, 3.13).

7. Во временной области исследуется переходная характеристика (ПХ) — реакция заданной цепи на ступеньку. На рабочем столе пакета собирается схема заданной цепи рис. 3.16, а и выполняются установки, значения которых показаны на рис. 3.16, б.



а

б

Рис. 3.16 — Моделирование во временной области:
а — схема для моделирования, б — установки в окне
Transient Analysis Limits

Результат моделирования цепи во временной области показан на рис. 3.17. Как видно, цепь практически не обладает колебательными свойствами. На ПХ проставлены две координатные метки — экстремального значения и максимального отрицательного размаха кривой ($-4m$), который составляет около 1% от экстремума. Это говорит о том, что характер свободных колебаний в цепи является практически апериодическим.

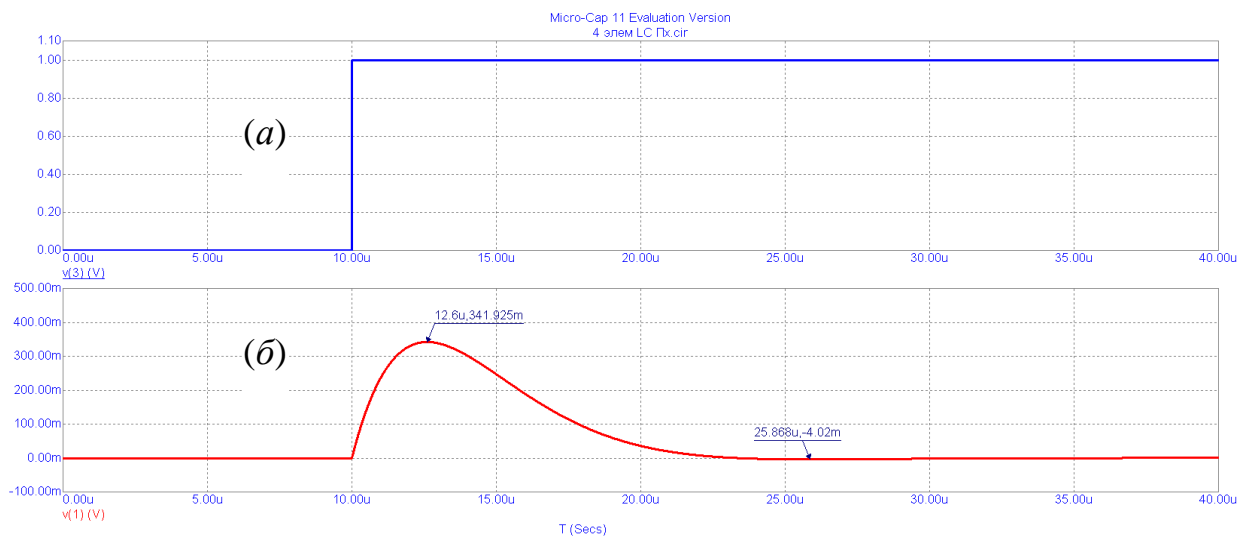


Рис. 3.17 — Ступенька (а) на входе цепи
и переходная характеристика (б) исследуемой цепи

Сопоставление графиков рис. 3.15 и рис 3.17 подтверждает предельные соотношения между АЧХ и ПХ: $АЧХ(0) = ПХ(\infty)$ и $АЧХ(\infty) = ПХ(0)$.

8. В итоговом заключении можно утверждать, что прогнозные и расчетные данные подтверждены опытами при выполнении обоих заданий лабораторной работы.

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»

Цель работы: опытное измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов и определение их основных параметров.

В ходе работы исследуются следующие три полупроводниковых прибора:

- 1) кремниевый диод,
- 2) биполярный транзистор,
- 3) полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом.

Лабораторная работа выполняется с помощью пакета компьютерного моделирования MicroCap11 Evaluation (Demo). Отчет по работе формируется в среде Microsoft Office Word.

Варианты индивидуальных заданий на лабораторную работу №2

№	Кремниевый диод	Биполярный транзистор	Полевой транзистор
1	1N3491 (1A)	2N2218 (100мА)	MPF102 (12мА, 10 В)
2	1N3889 (500мА)	2N2222 (100мА)	2N4393 (40мА, 10 В)
3	1N3899 (2A)	2N3020 (80мА)	2N3070 (5мА, 10 В)
4	1N4148 (20мА)	2N3252 (120 мА)	J308 (35мА, 10 В)
5	1N3900 (2A)	2N3439 (60 мА)	2N5545 (5мА, 5 В)
6	1N4001 (200мА)	2N3501 (150 мА)	2N4393 (40мА, 5 В)
7	1N5399 (100мА)	2N3725 (150 мА)	2N3822 (12мА, 5 В)
8	1N5391 (200мА)	2N4400 (160 мА)	2N3070 (5мА, 50 В)
9	MBR845 (20мА)	2N2368 (50 мА)	MPF102 (12мА, 5 В)
10	1N914 (20мА)	2N2222A (100мА)	J308 (35мА, 5 В)
11	1N3909 (3A)	2N2369 (30 мА)	2N4393 (40мА, 15 В)
12	MBR20100 (20мА)	2N3055A (200 мА)	2N5545 (5мА, 10 В)
13	MR500 (20мА)	2N3506 (200 мА)	2N3822 (12мА, 10 В)
14	1N4742 (5мА)	2N3903 (50 мА)	2N3070 (5мА, 15 В)
15	1N4933 (5мА)	2N3904 (80 мА)	MPF102 (12мА, 15 В)
16	1N4934 (10мА)	2N3946 (60 мА)	J308 (35мА, 15 В)
17	1N4935 (100мА)	2N4014 (150 мА)	2N4393 (40мА, 12 В)
18	1N4936 (50мА)	2N4123 (40 мА)	2N5545 (5мА, 15 В)
19	1N4937 (30мА)	2N4265 (300 мА)	2N3822 (12мА, 15 В)
20	MR502 (50мА)	2N4124 (80 мА)	J308 (35мА, 12 В)

Примечание: в столбцах для кремниевого диода и биполярного транзистора после указания типа прибора в скобках задано предельное значение тока через прибор. В столбце для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом в скобках заданы предельное значение тока стока и напряжения сток-исток.

Примечание: названные полупроводниковые приборы находятся в библиотеке компонентов пакета. При возникновении частных проблем с каким-либо компонентом допускается заменить его на аналогичный прибор. При этом в отчете необходимо письменно обосновать суть возникшей проблемы.

Содержание лабораторной работы

1. Для каждого полупроводникового прибора, указанного в индивидуальном варианте задания, снять ВАХ:

- для кремниевого диода — ВАХ в прямой и обратной областях,
- для биполярного транзистора — семейства входных, выходных и сквозную ВАХ,
- для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом — семейство выходных ВАХ и сквозную (передаточную) ВАХ.

2. В выбранной рабочей точке на ВАХ каждого прибора (выбор рабочей точки сделать самостоятельно, желательно в центре поля характеристик) определить с помощью графических построений и расчетов основные свойственные данному прибору параметры.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен включать указанные ниже сведения.

1. Цель лабораторной работы.
2. Данные варианта индивидуального задания.

3. Основной раздел работы, где последовательно для каждого прибора привести следующие сведения:

а) электрическую схему опыта и окно установок, с помощью которых пакет MicroCap11 рассчитывает и выводит на рабочий стол ВАХ изучаемого прибора,

б) графики ВАХ изучаемого прибора с удобными масштабными сетками по осям x и y ,

в) указание положения рабочей точки на ВАХ (выделить крестиком, жирной точкой, кружком, эллипсом ...), в которой определяются статические и динамические параметры прибора,

г) необходимую графическую и текстовую информацию на ВАХ (обязательно указание координатных меток рабочей точки, координатных меток приращений по осям x и y , текстовые вставки указания электрических величин, не отражаемых на графике при процедуре Stepping ...),

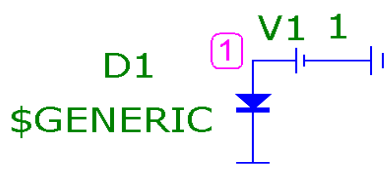
д) численные расчеты каждого параметра в формате: формула, численные значения величин, численный результат с указанием размерности. Вывод о корректности расчета (соответствия практическим численным рамкам для данного параметра), суждение о свойствах изучаемого прибора, касающихся мощности, напряжения, тока, эффективности усилительных свойств и проч. (например, «маломощный», «сильноточный», «с высоким коэффициентом усиления по току, напряжению» и проч.).

Пример отчета по лабораторной работе

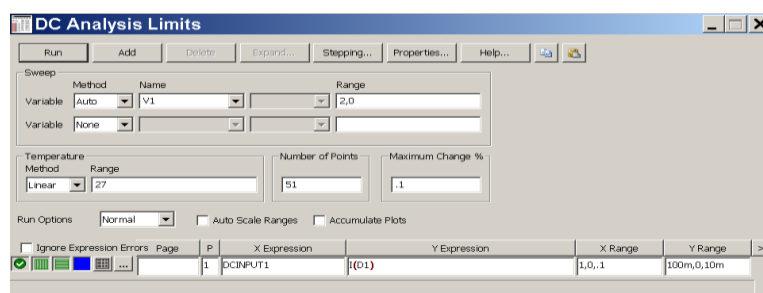
Далее в качестве примера части отчета по пункту 3 приводятся в требуемом порядке и объеме сведения по изучаемым полупроводниковым приборам.

Изучение кремниевого диода. Пусть задан виртуальный диод GENERIC, предел по току указан 100 мА. Диод выбирается из библиотеки пакета. На рис. 4.1, а показана собранная на рабочем столе схема для снятия

прямой ветви ВАХ диода. В пакете MicroCap11 расчет ВАХ приборов выполняется на постоянном токе (DC). Для этого в пункте меню Analyse выбирается опция DC. Открывается окно DC Analysis Limits, в котором необходимо задать нужные величины и их пределы (рис. 4.1, б). Переменной по оси x (горизонтальная ось напряжения) является по умолчанию выражение DCINPUT1, переменную по оси y (вертикальная ось тока) $I(D1)$ — ток диода D1 выбирают по пути: Y Expression — Variables — Device Current — $I(D1)$. Пределом по оси x (X Range) для полупроводникового диода является наибольшее прямое падение напряжения на переходе — в практике не более 1,2—1,5 В. Этот предел можно уточнить после вывода ВАХ на экран. В данном случае этот предел взят равным 1 В. Формат записи пределов: верхний, нижний. Разделителем является запятая, без пробелов. Разделителем значащих частей числа является точка. Пределы по оси y (Y Range) определяют величину прямого тока диода, пусть он задан 100 мА. В данном случае запись пределов по осям x и y имеет вид (1,0,.1) и (100m,0,10m). В этом формате записи цифра после второй запятой



а



б

Рис. 4.1 — Схема а) для снятия ВАХ диода
и установки б) в окне DC Analysis Limits

означает шаг масштабной сетки по оси.

Точность расчетов, от которой зависит «гладкость» ВАХ, можно задавать кнопкой Maximum Change %, в данном случае это .1 (0,1%).

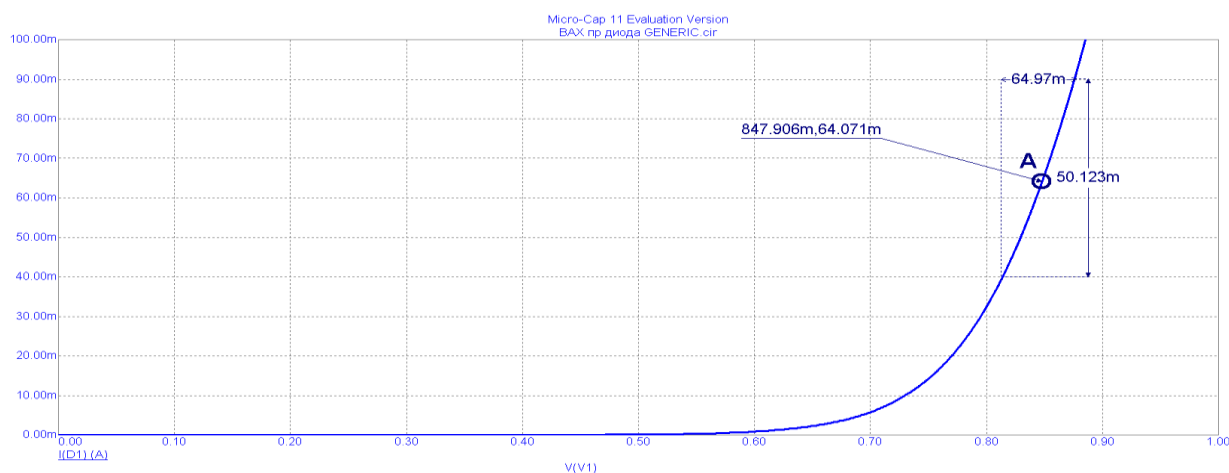


Рис. 4.2 — ВАХ диода GENERIC с нанесенными координатными метками

На рис. 4.2 показана снятая ВАХ изучаемого диода с нанесенными координатными метками. В выбранной рабочей точке **A** следует определить сопротивления постоянному току R_0 (статическое сопротивление) и переменному току R_i (динамическое сопротивление). Формат записи координат рабочей точки: **A** (U_0 , I_0), где U_0 , I_0 координаты рабочей точки. Фактические координаты рабочей точки **A** (847,9 мВ, 64,07 мА). Сопротивление постоянному току определено координатами рабочей точки

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} \Big|_{PT} = \frac{847,9 \text{ мВ}}{64,07 \text{ мА}} \Big|_{PT} = 13,2 \text{ Ом.}$$

Сопротивление переменному току

$$R_i = \frac{du}{di} \Big|_{PT} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \Big|_{PT} = \frac{64,97 \text{ мВ}}{50,12 \text{ мА}} \Big|_{PT} = 1,3 \text{ Ом.}$$

На рис. 4.3, *а* и рис. 4.3, *б* показаны схема для снятия обратной ветви ВАХ диода и необходимые установки в окне DC Analysis Limits. Обратная ветвь ВАХ диода показана на рис. 4.4. Как видно из рисунка максимально допустимое обратное напряжение диода GENERIC $U_{\text{обр макс}}$ составляет 480 В. При этом резко растет обратный ток лавинного пробоя.

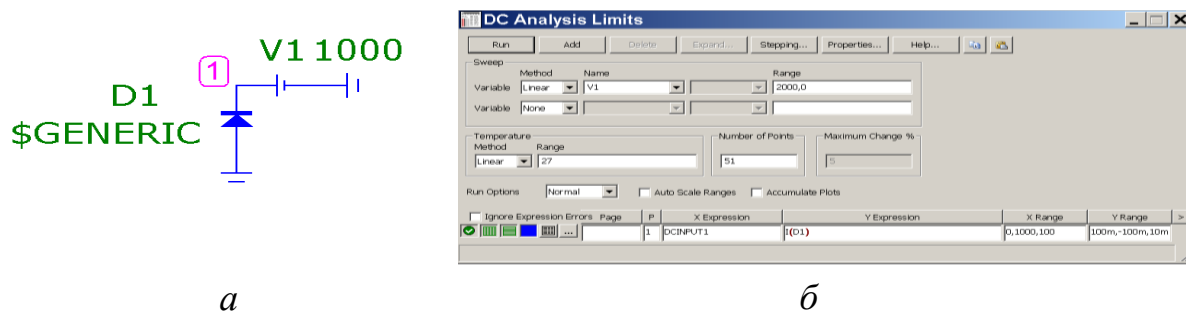


Рис. 4.3 — Схема *a*) для снятия обратной ветви ВАХ диода и установки *б*) в окне DC Analysis Limits

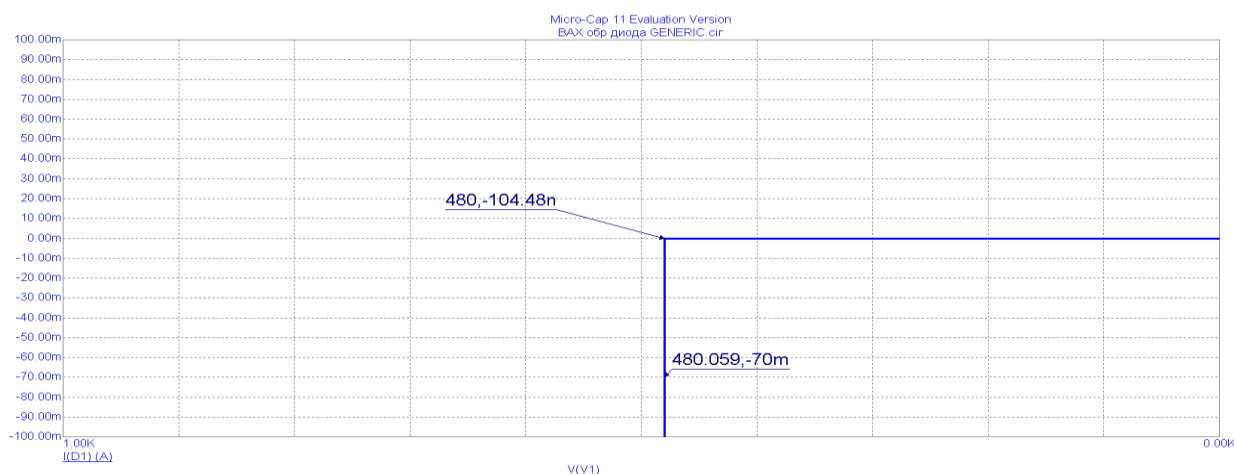


Рис. 4.4 — Обратная ветвь ВАХ диода GENERIC

По значениям своих параметров данный диод является кремниевым (резкий рост прямого тока начинается при напряжении более 700 мВ). Диод относится к подклассу выпрямительных среднечастотных (прямой ток до 100 мА при прямом падении напряжения около 0,9 В). По величине обратного напряжения может быть отнесен к высоковольтным ($U_{\text{обр макс}} = 480 \text{ В}$). Диод имеет довольно невысокие величины сопротивлений постоянному и переменному току ($R_0 = 13,2 \text{ Ом}$, $R_i = 1,3 \text{ Ом}$). При использовании в рабочей точке А рассеивает мощность $P = U_0 \cdot I_0 = 0,848 \text{ В} \cdot 0,064 \text{ А} \approx 54 \text{ мВт}$.

Изучение биполярного транзистора. Пусть задан виртуальный биполярный транзистор GENERIC, предел по току указан 80 мА. Транзистор выбирается из библиотеки пакета. На рис. 4.5 показаны собранная на рабо-

чем столе схема и окно установок DC Analysis Limits для снятия выходных ВАХ транзистора.

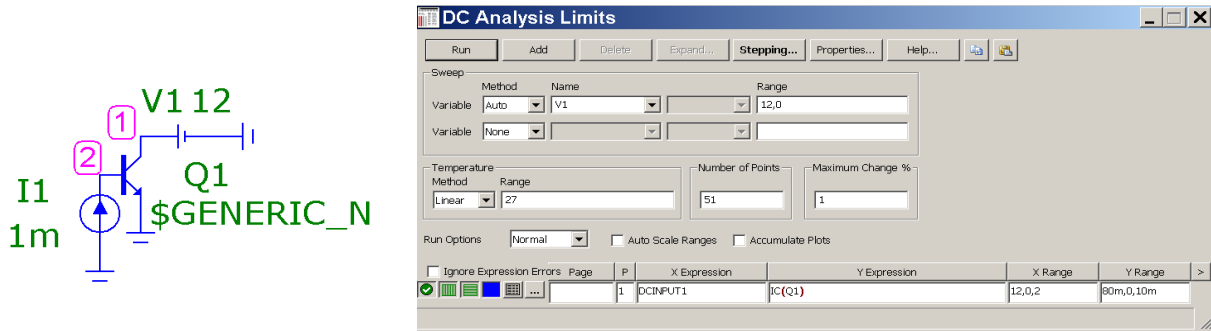


Рис. 4.5 — Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора GENERIC

Выходные ВАХ биполярного транзистора с нанесенными масштабными и текстовыми метками, необходимыми для численного расчета параметров, приведены на рис. 4.6.

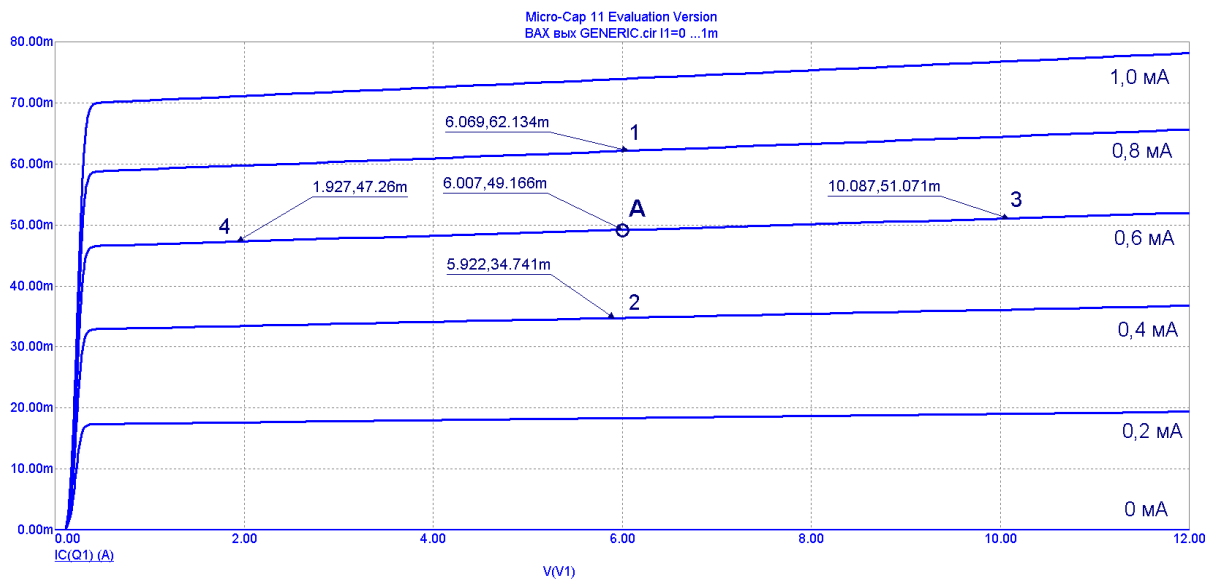


Рис. 4.6 — Выходные ВАХ биполярного транзистора GENERIC

На рис. 4.7 показаны собранная на рабочем столе схема и окно установок DC Analysis Limits для снятия входных ВАХ транзистора.

Входные ВАХ биполярного транзистора с нанесенными масштабными и текстовыми метками, необходимыми для численного расчета параметров, приведены на рис. 4.8.

На рис. 4.9 показаны собранная на рабочем столе схема и окно установок DC Analysis Limits для снятия сквозной ВАХ транзистора.

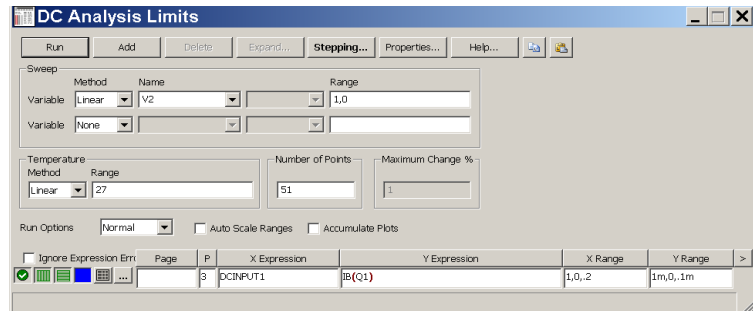
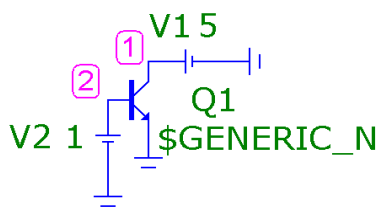


Рис. 4.7 — Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия входных ВАХ биполярного транзистора GENERIC

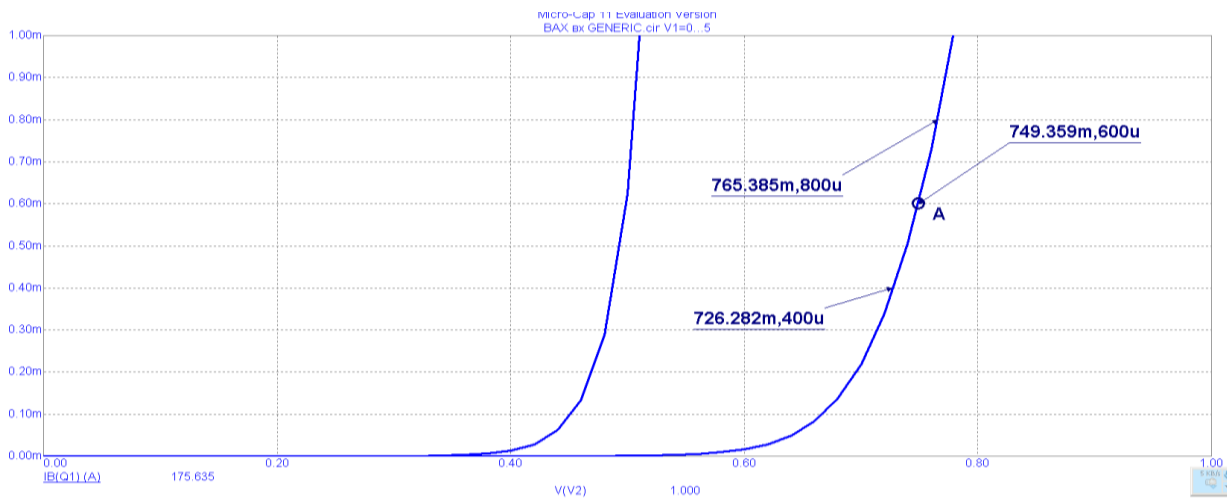


Рис. 4.8 — Входные ВАХ биполярного транзистора GENERIC

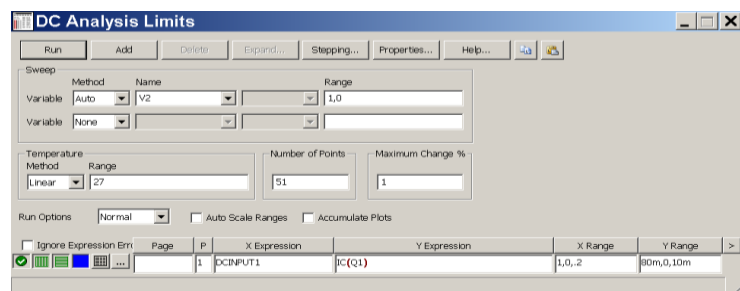
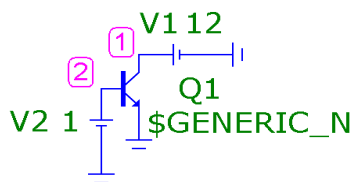


Рис. 4.9 — Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия сквозной ВАХ биполярного транзистора GENERIC

Сквозная ВАХ биполярного транзистора с нанесенными масштабными и текстовыми метками, необходимыми для численного расчета параметров, приведена на рис. 4.10.

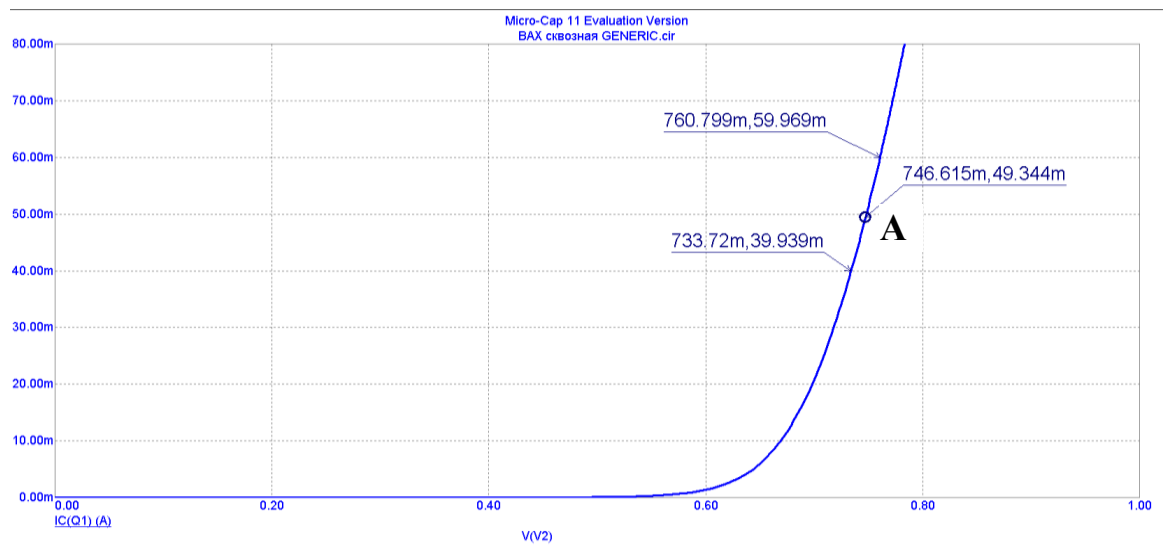


Рис. 4.10 — Сквозная ВАХ биполярного транзистора GENERIC

Итак, фактический материал для численного определения параметров изучаемого биполярного транзистора собран. Представим, прежде всего, рабочую точку (РТ). Рабочая точка А выбрана на семействе выходных ВАХ (рис. 4.6) и перенесена на семейство входных (рис. 4.8) и сквозную (рис. 4.10) ВАХ. На каждом графике ей соответствует пара координат. Зафиксируем координаты выбранной рабочей точки. Принятый формат записи координат следующий: РТ($U_{кэ0}$, $I_{к0}$, $I_{б0}$, $U_{бэ0}$). Координатные метки на рис. 4.6 и рис. 4.8 дают конкретный цифровой ряд А (6 В, 49,2 мА, 0,6 мА, 749,4 мВ).

На рисунках 4.6, 4.8 и 4.10 относительно рабочей точки симметрично выставлены координатные метки, которые позволяют сделать необходимые приращения для расчета основных параметров транзистора.

Рассчитываются следующие статические и динамические параметры транзистора в рабочей точке:

— входное $R_{0вх}$ и выходное $R_{0вых}$ сопротивления по постоянному току,

- h -параметры $h_{11Э}$, $h_{21Э}$, $1/h_{22Э}$ — динамические параметры транзистора,
- S — крутизна сквозной ВАХ транзистора.

$$R_{0ВХ} = \frac{U_{0БЭ}}{I_{0Б}} \Big|_{PT} = \frac{749,4 \text{ мВ}}{0,6 \text{ мА}} \Big|_{PT} = 1250 \text{ Ом};$$

$$R_{0ВЫХ} = \frac{U_{0КЭ}}{I_{0К}} \Big|_{PT} = \frac{6 \text{ В}}{49,2 \text{ мА}} \Big|_{PT} = 122 \text{ Ом};$$

$h_{11Э}$ — входное сопротивление биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (см. координатные метки на рис. 4.8)

$$h_{11Э} = R_{iВХ} = \frac{du_{БЭ}}{di_{Б}} \Big|_{PT} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \Big|_{PT} = \frac{(765,4 - 726,2) \text{ мВ}}{(0,8 - 0,4 \text{ мА})} \Big|_{PT} = 98 \text{ Ом};$$

$h_{21Э}$ — коэффициент усиления по току биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (см. координатные метки 1 и 2 на рис. 4.6)

$$h_{21Э} = \frac{di_{К}}{di_{Б}} \Big|_{PT} \approx \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \Big|_{PT} = \frac{(62,1 - 34,7) \text{ мА}}{(0,8 - 0,4) \text{ мА}} \Big|_{PT} = \frac{27,4 \text{ мА}}{0,4 \text{ мА}} = 68,5;$$

$1/h_{22Э}$ — выходное сопротивление биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (см. координатные метки 3 и 4 на рис. 4.6)

$$1/h_{22Э} = R_{iВЫХ} = \frac{du_{КЭ}}{di_{К}} \Big|_{PT} \approx \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_{К}} \Big|_{PT} = \frac{(10 - 2) \text{ В}}{(51,1 - 47,2) \text{ мА}} \Big|_{PT} = \frac{8 \text{ В}}{3,9 \text{ мА}} = 2051 \text{ Ом};$$

S — крутизна сквозной ВАХ биполярного транзистора. Измеряется в миллиамперах/вольт. По ней можно судить о потенциальных усилительных свойствах транзистора по напряжению K_U , в реальных схемах усилителей недостижимых (см. координатные метки на рис. 4.10):

$$S = \frac{di_{К}}{du_{БЭ}} \Big|_{PT} \approx \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{БЭ}} \Big|_{PT} = \frac{(60 - 40) \text{ мА}}{(761 - 734) \text{ мВ}} \Big|_{PT} = \frac{20 \text{ мА}}{27 \text{ мВ}} \Big|_{PT} = 741 \text{ мА/В};$$

$$K_U = S \cdot R_{iВЫХ} = 741 \text{ мА/В} \cdot 2051 \text{ Ом} = 1519;$$

P_K — мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора в рабочей точке **A**

$$P_K = U_{0КЭ} \cdot I_{0К} = 6 \text{ В} \cdot 49,2 \text{ мА} = 295 \text{ мВт}.$$

По значениям своих параметров данный транзистор можно отнести к среднemosшным, он имеет невысокое входное сопротивление $R_{i_{BX}} = 98 \text{ Ом}$, большое выходное сопротивление $R_{i_{ВЫХ}} = 2051 \text{ Ом}$, среднее значение коэффициента усиления по току $h_{21Э} = 68,5$, достаточно высокую для биполярного транзистора крутизну $S = 741 \text{ мА/В}$.

Изучение полевого транзистора с управляющим p - n -переходом GENERIC (JFET с каналом n -типа, 5 мА, 10 В). Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия выходных ВАХ полевого транзистора GENERIC показаны на рис. 4.11. После указанных установок открывается окно Stepping, выбирается объект V2 (Step What) и устанавливаются пределы 0 (From), $-3,5$ (To), 0.5 (Step Value). Выходные ВАХ полевого транзистора GENERIC с нанесенными масштабными и текстовыми метками, необходимыми для численного расчета параметров, приведены на рис. 4.12.

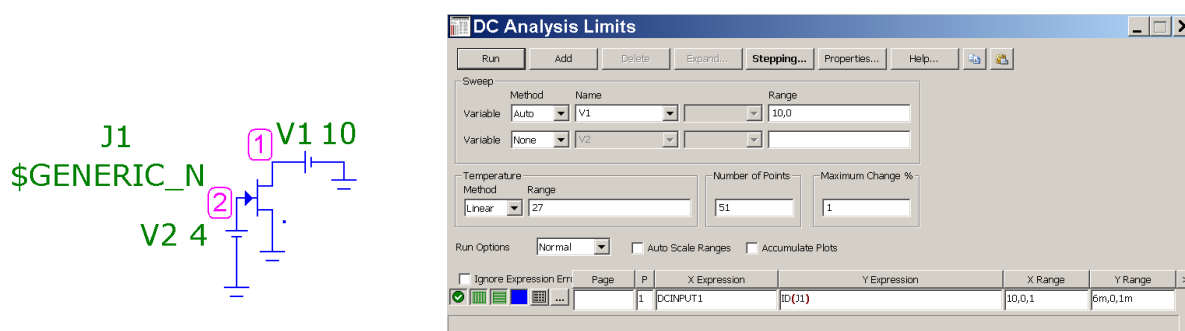


Рис. 4.11 — Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия выходных ВАХ полевого транзистора GENERIC

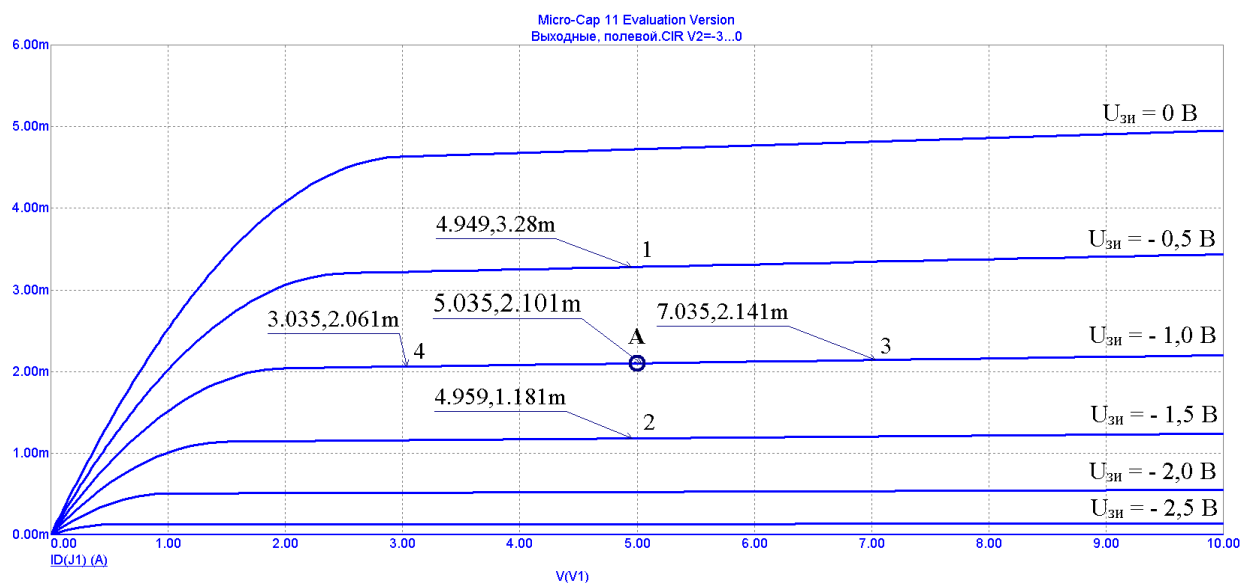


Рис. 4.12 — Выходные ВАХ полевого транзистора GENERIC

Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия сквозной ВАХ полевого транзистора GENERIC показаны на рис. 4.13. Сквозная ВАХ полевого транзистора GENERIC с нанесенными масштабными и текстовыми метками, необходимыми для численного расчета параметров, приведена на рис. 4.14.

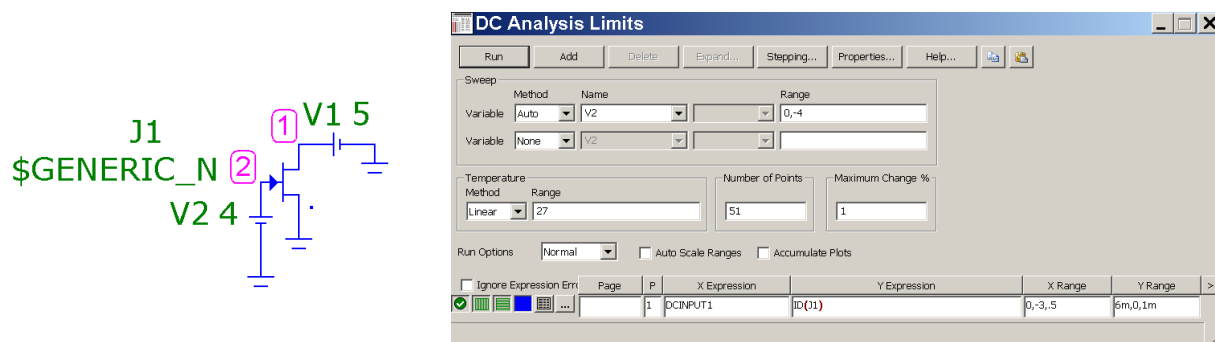


Рис. 4.13 — Схема измерения и окно установок DC Analysis Limits для снятия сквозной ВАХ полевого транзистора GENERIC

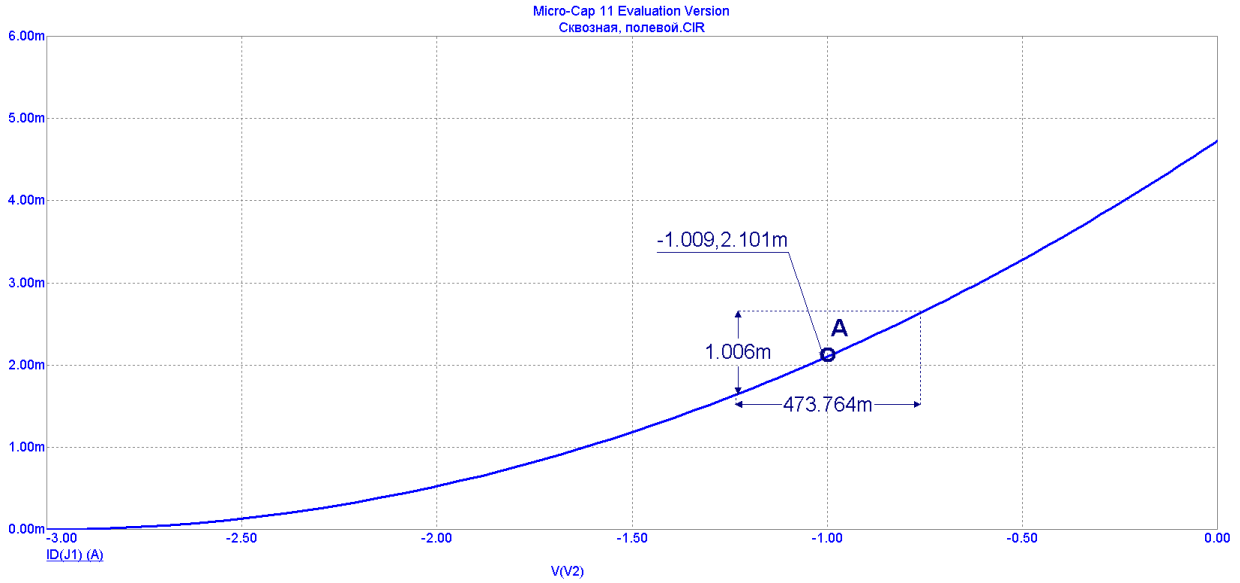


Рис. 4.14 — Сквозная ВАХ полевого транзистора GENERIC

Рабочая точка **A** выбрана на семействе выходных ВАХ (рис. 4.12) и перенесена на сквозную ВАХ (рис. 4.14). Формат записи координат рабочей точки **A** ($U_{0\text{СИ}}$, $I_{0\text{С}}$, $U_{0\text{ЗИ}}$). Численное значение координат взято из графиков ВАХ транзистора: **A** (5 В, 2,1 мА, 1,0 В). Эти числа и нанесенные на рисунках 4.12 и 4.14 координатные метки позволяют рассчитать основные параметры транзистора.

Крутизну транзистора можно численно рассчитать как по семейству выходных ВАХ рис. 4.12 (см. координатные метки 1 и 2)

$$S = \left. \frac{di_{\text{С}}}{du_{\text{ЗИ}}} \right|_{PT} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{С}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \right|_{PT} = \frac{(3,28 - 1,18) \text{ мА}}{(1,5 - 0,5) \text{ В}} \Big|_{PT} = \frac{2,1 \text{ мА}}{1 \text{ В}} = 2,1 \text{ мА/В},$$

так и по сквозной ВАХ рис. 4.14 (см. координатные метки приращений)

$$S = \left. \frac{di_{\text{С}}}{du_{\text{ЗИ}}} \right|_{PT} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{С}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \right|_{PT} = \frac{1 \text{ мА}}{0,474 \text{ В}} \Big|_{PT} = 2,1 \text{ мА/В}.$$

Выходное сопротивление R_i можно рассчитать по семейству выходных ВАХ рис. 4.12 (см. координатные метки 3 и 4)

$$R_i = \left. \frac{du_{\text{СИ}}}{di_{\text{С}}} \right|_{PT} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{С}}} \right|_{PT} = \frac{(7,035 - 3,035) \text{ В}}{(2,141 - 2,061) \text{ мА}} \Big|_{PT} = \frac{4 \text{ В}}{0,08 \text{ мА}} = 50 \text{ кОм};$$

K_U — потенциальный коэффициент усиления по напряжению K_U :

$$K_U = S \cdot R_i = 2,1 \text{ мА/В} \cdot 50 \text{ кОм} = 105;$$

P_K — мощность, рассеиваемая транзистором в рабочей точке А:

$$P_K = U_{0\text{си}} \cdot I_{0\text{с}} = 5 \text{ В} \cdot 2,1 \text{ мА} = 10,5 \text{ мВт}.$$

По значениям своих параметров данный транзистор можно отнести к маломощным, он имеет большое выходное сопротивление $R_i = 50 \text{ кОм}$, среднее значение крутизны $S = 2,1 \text{ мА/В}$, высокое значение потенциально-го коэффициента усиления по напряжению $K_U = 105$ и может быть использован в предварительных каскадах усиления многокаскадных усилителей.

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«ИЗУЧЕНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРОВ»

Цель работы. Целью настоящей работы является изучение условий самовозбуждения импульсных и гармонических автогенераторов, исследование стационарного режима их работы, изучение различных способов построения схем автогенераторов, практика работы в пакете MicroCap 11.

В ходе лабораторной работы изучаются импульсный генератор на основе триггера Шмитта и гармонический *LC*-автогенератор, который строится на основе операционного усилителя. Лабораторная работа включает два задания.

Задание 1. Опытное изучение импульсного генератора на основе триггера Шмитта.

Описание генератора дано в параграфе 4.5 [2]. Вначале необходимо представить триггер Шмитта. Логический элемент триггер Шмитта находится в библиотеке пакета по пути Analog Primitives — Macros — Blocks — Schmitt. Он задан в виде виртуальной модели с редактируемыми параметрами. На рис. 5.1, *а* показано условное графическое обозначение (УГО) триггера Шмитта, рис. 5.1, *б* представляет его передаточную характеристику (на рисунке жирная сплошная и жирная пунктирная линии), и на рис. 5.1, *в* для примера показано окно установок параметров передаточной характеристики.

Как видно из поведения передаточной характеристики (ПХ) на рис. 5.1, *б*, триггер Шмитта является инверсным логическим элементом, для этого необходимо сделать установку Param: SIGN = −1.

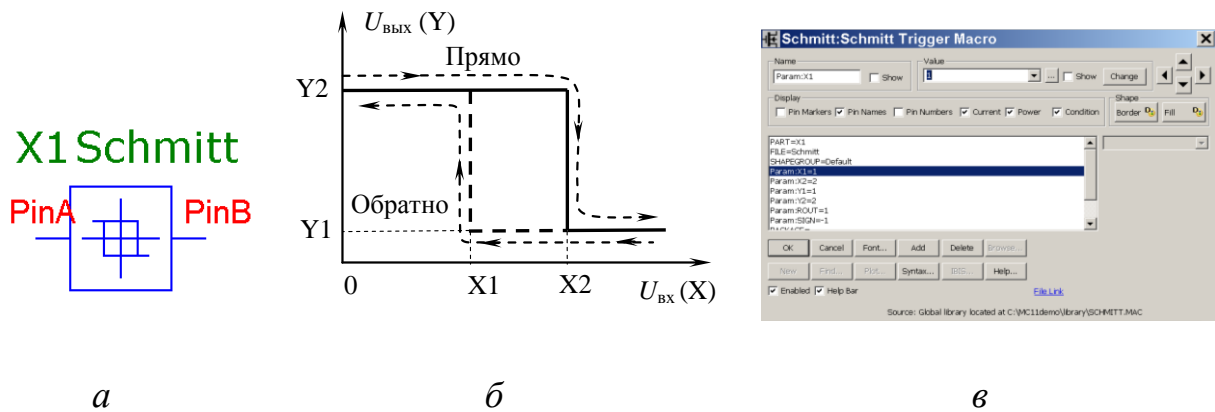


Рис. 5.1 — УГО триггера Шмитта (а), передаточная характеристика (ПХ) триггера Шмитта (б), окно установок параметров ПХ (в)

Смысл других параметров передаточной характеристики заключается в следующем: при увеличении входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ от 0 до величины $X2$ (на рисунке помечено «Прямо»), на выходе элемента имеет место высокий уровень напряжения $Y2$. В момент $U_{\text{ВХ}} = X2$ (состояние называют «ВКЛЮЧЕНО») напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ}}$ скачком принимает низкий уровень $Y1$ и остается таким при дальнейшем увеличении $U_{\text{ВХ}}$. При снижении входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ (на рисунке помечено «Обратно») ПХ следует жирной пунктирной линии до величины $X1$, сохраняя низкий уровень $Y1$ на выходе. В момент $U_{\text{ВХ}} = X1$ (состояние называют «ВЫКЛЮЧЕНО») напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ}}$ скачком принимает высокий уровень $Y2$ и остается таким при дальнейшем снижении $U_{\text{ВХ}}$ до нуля. Таким образом, на передаточной характеристике имеет место своеобразная петля гистерезиса, что и отличает триггер Шмитта от других логических элементов. Благодаря своеобразной ПХ на основе триггера Шмитта можно строить импульсные генераторы и формирователи колебаний.

В таблице 5.1 представлены варианты исходных данных для выполнения задания 1. В ней указаны значения элементов R и C генератора и параметры $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$ передаточной характеристики триггера Шмитта.

Таблица 5.1 — Варианты исходных данных для выполнения задания 1

Индивидуальные варианты задания № 1										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C , мкФ	1	1	2	2	2	2	1,2	1,2	1,2	1,3
R , кОм	10	10	10	8	5	9	10	8	8	9
X_1 , В	2	2	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5
X_2 , В	3	4	4	4	4	4	3	3	3,5	3,5
Y_1 , В	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0,5
Y_2 , В	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C , мкФ	0,8	0,8	0,9	1	1,5	1,6	1,5	0,8	0,8	1
R , кОм	9	9	11	10	8	8	5	13	20	15
X_1 , В	2,5	2,5	1	2	2	2	2	2	2	2
X_2 , В	3,5	3,5	4	4	3	3	3	3,5	3,5	3,5
Y_1 , В	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5
Y_2 , В	6	4	6	5	5	5	5	5	5	5

Задание 2. Изучение гармонического LC -автогенератора на основе операционного усилителя.

В таблице 5.2 приведены варианты исходных данных для выполнения задания 2.

В ней указаны тип операционного усилителя (ОУ) и значения элементов L , C и r колебательного контура гармонического генератора.

Таблица 5.2 — Варианты исходных данных для выполнения задания 1

Вариант	Тип ОУ	Элементы колебательного контура		
		L , мкГн	C , нФ	r , Ом
1	LF347	240	3,6	8
2	LF155	220	4,0	10
3	LM343	290	2,7	11
4	OP 15A	280	3,1	12
5	LM344	300	2,8	13
6	LF347	260	3,0	9
7	LM144	310	2,7	13
8	LF155	320	2,5	15
9	LM344	280	3,0	11
10	LF347	290	2,9	9
11	LF400C	270	3,5	10
12	LM343	310	2,5	12
13	OP 15A	270	3,5	9
14	LM344	310	2,9	11
15	LF347	320	3,3	13
16	LF155	300	2,4	12
17	LF155A	280	3,4	9
18	OP 15A	290	3,5	10
19	LF347	250	3,6	9
20	OP 27	340	2,7	8

Примечание: названные модели операционных усилителей находятся в библиотеке компонентов пакета. При возникновении частных проблем с какой-либо моделью ОУ допускается заменить ее на аналогичный прибор. При этом в отчете необходимо письменно обосновать суть возникшей проблемы.

Содержание лабораторной работы

1. При опытном изучении импульсного генератора на основе триггера Шмитта на рабочем столе пакета собирается испытуемая схема, делаются необходимые установки в соответствии с индивидуальным заданием, производится запуск генератора и анализируются полученные осциллограммы колебаний.

2. При изучении высокочастотного LC -автогенератора (рис. 4.6) [2] вначале делаются предварительные расчеты. Необходимо рассчитать параметры колебательного контура LC : резонансную частоту f_p , волновое сопротивление ρ , собственную добротность Q , сопротивление колебательного контура при резонансе R_0 , эквивалентную добротность с учетом шунтирования Q_{Σ} , полосу пропускания Δf_{07} , а также величину коэффициента обратной связи K_{oc} (4.13) [2] (при величине сопротивления $R = 10$ кОм).

3. Опытным путем подтвердить рассчитанные параметры колебательного контура LC , для чего снять АЧХ и ФЧХ с помощью пакета MicroCap 11. Сравнить опытные данные с расчетными данными. Сделать выводы.

4. Собрать схему высокочастотного LC -автогенератора на рабочем столе пакета MicroCap 11 и запустить его, снять осциллограммы колебаний в характерных узлах схемы. Определить частоту генерации f_r , сравнить ее с частотой резонанса контура f_p . Сделать выводы.

5. Составить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цель лабораторной работы.

2. Опытное изучение импульсного генератора на основе триггера Шмитта. В отчете привести испытуемую схему, показать необходимые установки в соответствии с индивидуальным заданием, запустить генератор и сделать анализ полученных осциллограмм колебаний.

3. Расчетная часть, в которой для высокочастотного LC -автогенератора рассчитываются параметры колебательного контура LC :

- резонансная частота f_p по формуле:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad (5.1)$$

- волновое сопротивление ρ по формуле:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (5.2)$$

- собственная добротность Q по формуле:

$$Q = \frac{\rho}{r}; \quad (5.3)$$

- сопротивление контура при резонансе R_0 по формуле:

$$R_0 = Q \cdot \rho; \quad (5.4)$$

– эквивалентная добротность контура Q_{Σ} с учетом шунтирования его сопротивлением R по формуле:

$$Q_{\Sigma} = \frac{Q}{1 + \frac{R_0}{R}}; \quad (5.5)$$

- полоса пропускания Δf_{07} по формуле:

$$\Delta f_{07} = f_p / Q_{\Sigma}; \quad (5.6)$$

- величина коэффициента обратной связи K_{oc} по формуле:

$$K_{oc} = R_0 / (R_0 + R). \quad (5.7)$$

4. Опытное подтверждение рассчитанных ранее параметров колебательного контура LC , для чего:

- собрать на рабочем столе схему и выполнить установки в окне AC Analysis Limits пакета MicroCap 11 для снятия АЧХ и ФЧХ колебательного контура LC ;
- привести в отчете графики АЧХ и ФЧХ колебательного контура со всеми необходимыми координатными метками, нанесенными на графики;

– привести в отчете следующие опытные данные: резонансная частота f_p , величина коэффициента обратной связи K_{oc} , полоса пропускания Δf_{07} колебательного контура, эквивалентная добротность колебательного контура $Q_{\Sigma} = f_p / \Delta f_{07}$. Сделать выводы о соотношении опытных и расчетных данных.

5. Сведения по результатам моделирования высокочастотного LC -автогенератора, включающие следующие позиции:

– рабочая схема высокочастотного LC -автогенератора. На схеме должны быть указаны имена (обозначения) и значения всех элементов в соответствии с заданием,

– обоснование условий самовозбуждения автогенератора. Для запуска автогенератора необходимо обеспечить баланс амплитуд: коэффициент усиления неинвертирующего усилителя на ОУ должен быть не менее величины $1 / K_{oc}$;

– установки в окне Transient Analysis Limits для изучения работы автогенератора;

– осциллограммы колебаний в характерных узлах схемы — на выходе генератора и на выходе ОУ с нанесенными координатными метками для определения периода колебаний и размаха генерируемых колебаний;

– определение частоты генерации f_r по масштабным меткам, сравнение ее с частотой резонанса колебательного контура f_0 . Обсудить результаты опыта.

6. Выводы по лабораторной работе.

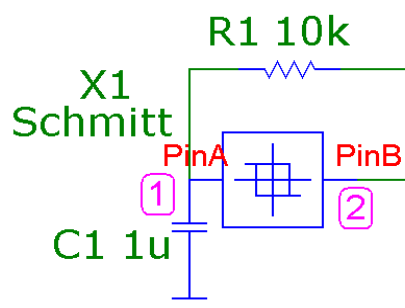
Пример выполнения лабораторной работы и методические указания

Далее по пунктам содержания отчета по лабораторной работе рассмотрен пример ее выполнения по следующим исходным данным:

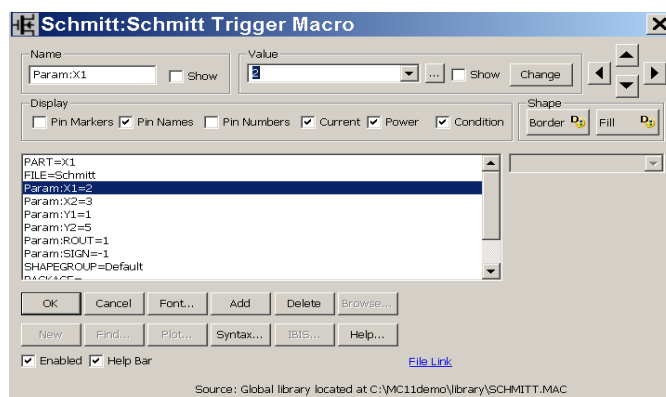
Задание 1 Вариант	Элемент	Установки параметров схемы генератора						
		C, мкФ	R, кОм	SIGN	X1	X2	Y1	Y2
xx	X1 Schmitt	1	10	-1	2	3	1	5
Задание 2 Вариант	Тип ОУ	Элементы колебательного контура						
		L, мГн	C, нФ	r, Ом				
xx	GENERIC	1	1	10				

Одновременно делаются необходимые методические указания и пояснения по работе в моделирующем пакете MicroCap 11.

Пункт 2. Опытное изучение импульсного генератора на основе триггера Шмитта. На рис. 5.2 показана схема импульсного генератора (а) и установки (б) в окне Schmitt Trigger Macro пакета MicroCap 11 в соответствии с заданием. Параметр ROUT (выходное сопротивление триггера Шмитта оставить по умолчанию равным 1 Ом), параметр SIGN= -1 (наличие инверсии по выходу триггера Шмитта).



а



б

Рис. 5.2 — Схема импульсного генератора (а) и установки (б) в окне Schmitt Trigger Macro пакета MicroCap 11 в соответствии с заданием

На рис. 5.3 показаны установки в окне Transient Analysis Limits для изучения работы импульсного генератора. Разумеется, пределы X Range (.24,.2,10m) и Y Range (3.2,1.8,0.2), а также (6,0,1) были уточнены после предварительного (пробного) запуска генератора. В частности, пределы по X (временная ось) несколько неожиданны: это интервал времени от 200

до 240 миллисекунд. За наблюдаемый интервал времени на рабочий стол надо вывести 3—4 периода колебаний, ни больше, ни меньше. Это наиболее удобно для наблюдения временных процессов. Но почему не от 0 до 40 мс? Дело в том, что расчетные процедуры в пакете тоже «стартуют» в момент запуска Run, а они зачастую требуют немалого ресурса времени, т. е. с момента запуска возникает своеобразный «переходный процесс», только по завершении которого на рабочем столе появляются ожидаемые осциллограммы. Поэтому перед пуском моделирования желательно на оси X установить «панораму», например в данном случае от 0 до 1 с, а затем, убедившись, что колебания возникли, «выхватить» из их череды интервал в 3—4 периода. Это и позволит уточнить предел по времени в окне установок. Цифра после второй запятой в записи пределов означает шаг масштабной сетки.

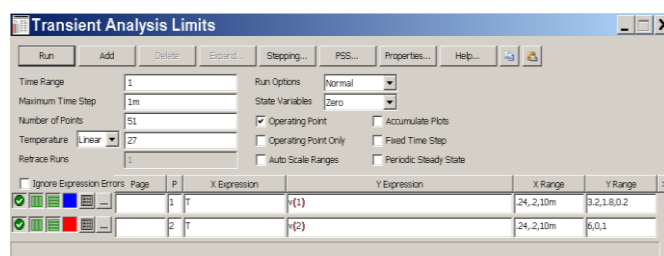


Рис. 5.3 — Установки в окне Transient Analysis Limits для изучения работы импульсного генератора

На рис. 5.4 показаны осциллограммы колебаний: *а* — на входе триггера Шмитта (на конденсаторе) и *б* — на выходе генератора.

Как видно из рис. 5.4, *а*, напряжение на конденсаторе начинает нарастать от 2 В (заряд конденсатора C через резистор R напряжением 5 В с выхода триггера). В соответствии с рис. 5.1 это прямая ветвь ПХ триггера Шмитта. Как только напряжение достигло 3 В, происходит «Включение» и напряжение в узле 2 (PinB) скачком падает до 1 В. Конденсатор начинает разряжаться от напряжения 3 В через резистор R и выходное сопротивление

триггера (обратная ветвь ПХ триггера Шмитта). В момент достижения уровня 2 В происходит «Выключение» триггера, напряжение в узле 2 скачком нарастает до 5 В, конденсатор снова начинает заряжаться и т. д.

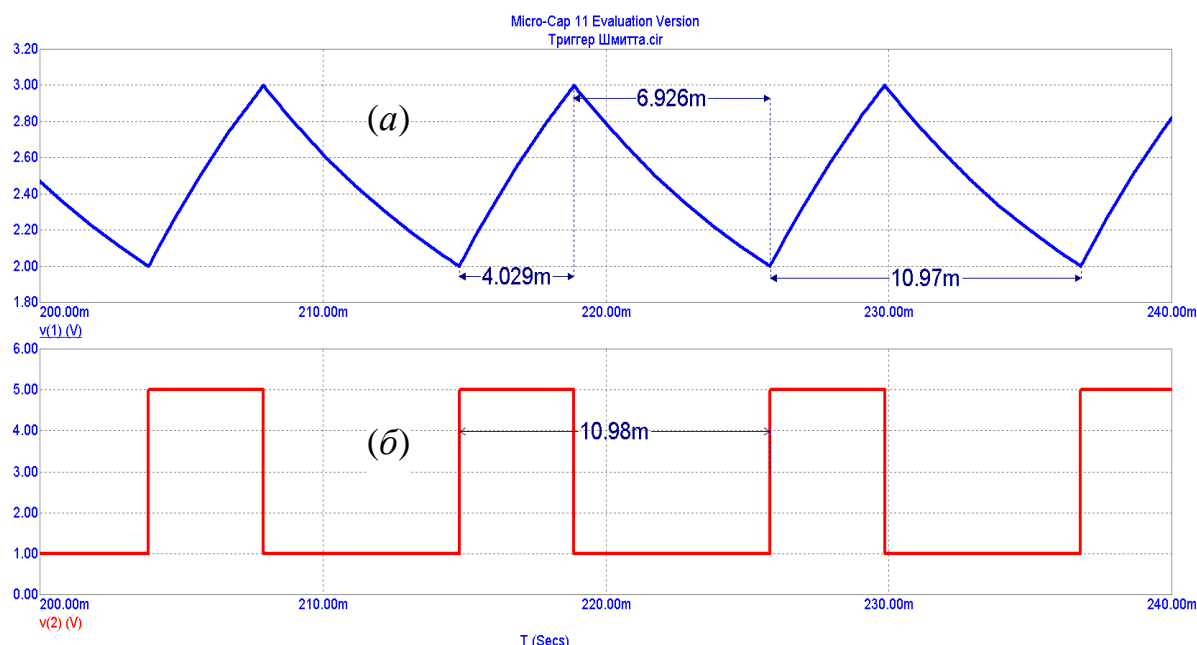


Рис. 5.4 — Осциллограммы колебаний:
a — на входе триггера Шмитта (на конденсаторе)

Согласно нанесенным на рис. 5.4 координатным меткам суммарное время заряда конденсатора (4,03 мс) и его разряда (6,9 мс) составляет период колебания (11 мс), что соответствует частоте повторения импульсов 91 Гц. Следует отметить, что точность «прикрепления» координатных меток к желаемым точкам кривых конечна, поэтому при фиксации числовых данных оправданы округления. Форма генерируемых импульсов прямоугольная, скважность приближается к 3. Размах импульсов равен 5 В.

Пункт 3 «Содержание отчета по лабораторной работе». Расчетная часть. Параметры колебательного контура рассчитываются по формулам (5.1—5.7):

$$- \text{резонансная частота } f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1\cdot 10^{-3} 1\cdot 10^{-9}}} = 159,15 \text{ кГц};$$

- волновое сопротивление $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9}}} = 1000 \text{ Ом} = 1 \text{ кОм}$;
- добротность свободного контура $Q = \frac{\rho}{r} = \frac{1000}{10} = 100$;
- сопротивление колебательного контура на резонансной частоте $R_0 = Q \cdot \rho = 100 \cdot 1 \text{ кОм} = 100 \text{ кОм}$;
- эквивалентная добротность контура Q_{Σ} с учетом шунтирования его сопротивлением $R = 10 \text{ кОм}$

$$Q_{\Sigma} = \frac{100}{1 + \frac{100}{10}} = 9,1;$$

- полоса пропускания $\Delta f_{07} = f_p / Q_{\Sigma} = 159,15 \text{ кГц} / 9,1 = 17,5 \text{ кГц}$;
- величина коэффициента обратной связи K_{oc} , при $R = 10 \text{ кОм}$

$$K_{oc} = R_0 / (R_0 + R) = 100 \text{ кОм} / (100 + 10) \text{ кОм} = 0,91.$$

Пункт 4 «Содержание отчета по лабораторной работе». Опытное подтверждение расчетных параметров колебательного контура LC .

На рисунке 5.5 показаны схема (рис. 5.5, а) и установки (рис. 5.5, б) в окне AC Analysis Limits пакета MicroCap 11 для снятия АЧХ и ФЧХ колебательного контура LC . Схема несколько необычна, поскольку представляет собой полную схему автогенератора с разорванной цепью обратной связи, дополненную источником сигнала типа GENERAL. Эта схема превращается в схему автогенератора, если соединить узлы 6 и 5. Пределы по частоте в окне установок AC Analysis Limits взяты 100—210 кГц — симметрично относительно ожидаемой резонансной частоты $f_p = 159 \text{ кГц}$. Параметр Frequency Range (Auto) принят 1 МГц — больше любого из пределов по частоте. Точность расчетов Maximum Change % принята 0,1%. Остальные установки оставлены по умолчанию. Выходным является узел 2. На схеме рис. 5.5, а показаны обозначения и значения всех элементов в соответствии с заданием.

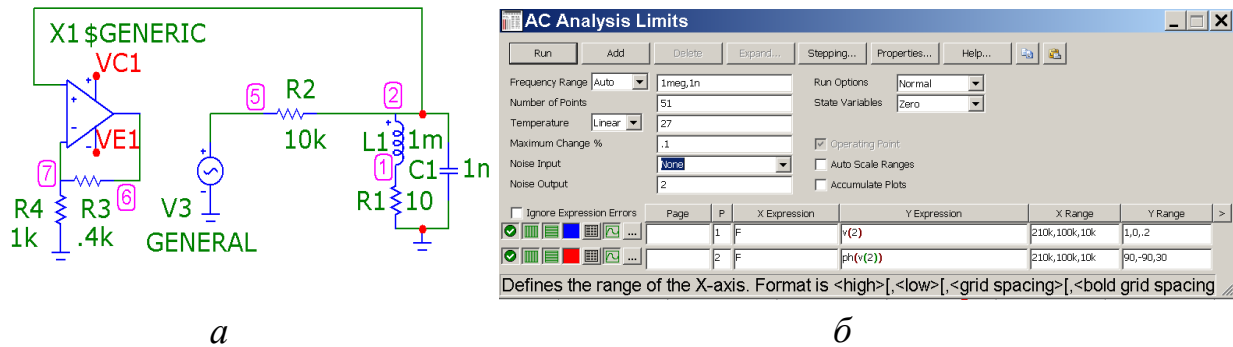


Рис. 5.5 — Схема (а) и установки (б) в окне AC Analysis Limits пакета MicroCap 11 для снятия АЧХ и ФЧХ колебательного контура LC

На рис. 5.6 показаны графики АЧХ и ФЧХ колебательного контура с необходимыми координатными метками, нанесенными на графики. Центральная метка (159,21 кГц; 0,91) подтверждает расчет резонансной частоты $f_p = 159,15$ кГц и $K_{oc} = 0,91$. Метка Horizontal Tag Mode 17,7 кГц сделана на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимума кривой ($0,91/\sqrt{2} = 0,64$) и является полосой пропускания колебательного контура. Расчетное значение полосы пропускания $\Delta f_{07} = 17,5$ кГц. Опытное значение эквивалентной добротности колебательного контура $Q_{\Sigma} = f_p / \Delta f_{07} = 159,2 / 17,7 = 8,99 \approx 9$ практически совпадает с рассчитанным ранее значением 9,1.

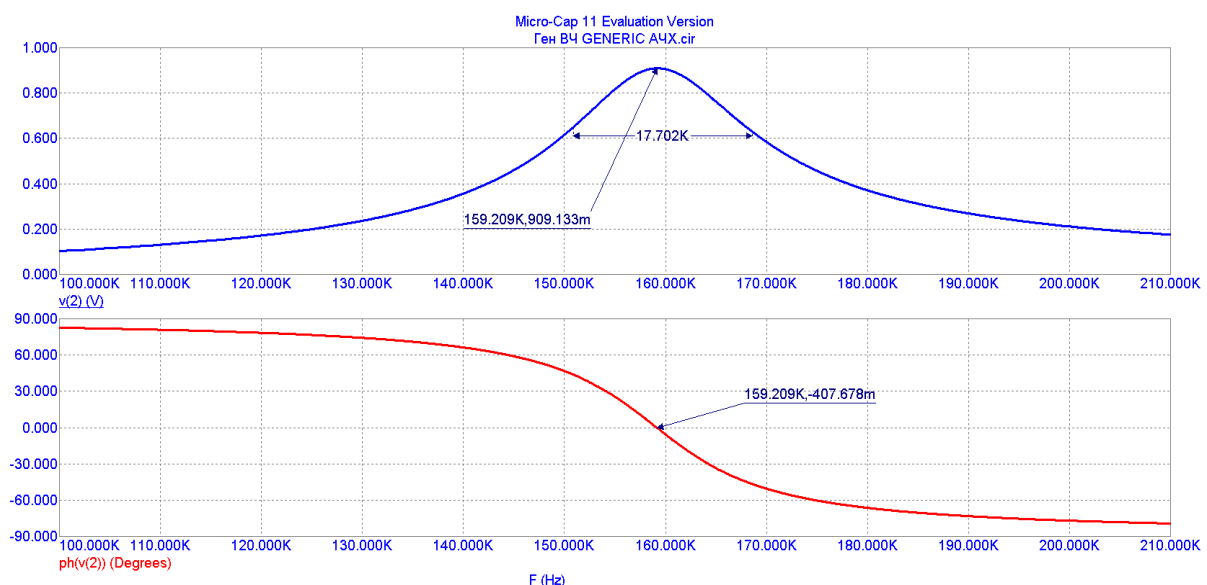


Рис. 5.6 — АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура

Таким образом, опытные данные подтвердили расчетные значения резонансной частоты f_p , величины коэффициента обратной связи K_{oc} , полосы пропускания Δf_{07} и эквивалентной добротности колебательного контура Q_{Σ} .

Незначительные расхождения опытных и расчетных значений (около 1%) объясняются неточностью установок масштабных меток на опытных кривых и округлениями при расчетах.

Пункт 5. Сведения по результатам моделирования высокочастотного LC-автогенератора. На рис. 5.7 показана рабочая схема (рис. 5.7, а) и окно установок (рис. 5.7, б) Transient Analysis Limits для изучения работы высокочастотного LC-автогенератора. На схеме указаны обозначения и значения всех элементов в соответствии с заданием.

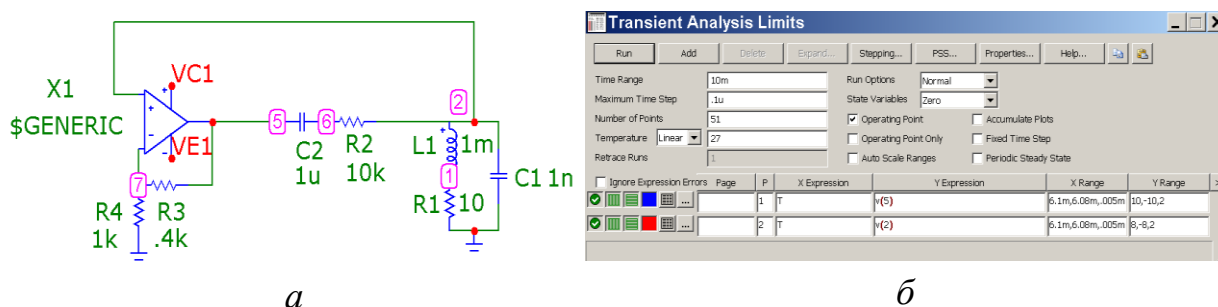


Рис. 5.7 — Рабочая схема а) и установки б) в окне Transient Analysis Limits для изучения работы высокочастотного автогенератора

Пояснение установок в окне Transient Analysis Limits (рис. 5.7, б). Характерные осциллограммы выводятся в узлах 2 (выходное напряжение автогенератора, прямой вход ОУ) и 5 (выход ОУ). Особое внимание уделяется двум параметрам: временному интервалу, на котором выводятся осциллограммы (X Range) и шагу дискретизации Minimum Time Step. Временной интервал берется таким, чтобы вывести на экран 3—4 периода колебания, т. е. $(3—4) \cdot T$, где T — период колебания. Численная оценка: $(3—4) \cdot T = (3—4) \cdot (1/f_p) = (3—4) \cdot (1/159,2 \cdot 10^3) = (3—4) \cdot 6 \text{ мкс} = 18—24 \text{ мкс}$. В данном случае интервал принят 20 мкс. Ввиду больших затрат вычислительных ресурсов пакета на расчеты осциллограмм появление их на экране

значительно запаздывает с момента запуска (Run). В данном случае интервал 20 мкс заключен в пределах от 6,08 мс до 6,1 мс. Достаточное значение параметра Minimum Time Step 0,1 мкс.

Сделаем оценки условий самовозбуждения автогенератора. Баланс фаз в схеме выполнен за счет положительной обратной связи.

Рассмотрим выполнение условия баланса амплитуд. Коэффициент усиления по прямому входу ОУ с цепью отрицательной обратной связи, состоящей из резисторов R_3 и R_4 , равен $K = (1 + R_3/R_4) = (1 + 0,4/1) = 2,4$. Поскольку фактическое значение коэффициента обратной связи $K_{oc} = 0,91$, условие баланса амплитуд $K \cdot K_{oc} = 2,4 \cdot 0,91 = 2,2 \geq 1$ выполнено.

После пуска генератора в нем возникнут колебания и будут нарастать до стационарной величины. В стационарном режиме амплитуда колебаний на выходе ОУ достигает не более 75% от величины напряжения источника питания операционного усилителя (для ОУ общей модели GENERIC $E_{пит} = \pm 15$ В). Форма колебаний на выходе ОУ при этом резко отличается от гармонической. Однако форма выходного колебания автогенератора (на колебательном контуре) будет гармонической, так как напряжение на нем пропорционально первой гармонике тока через него.

На рис. 5.8 показаны осциллограммы колебаний в характерных узлах схемы — на выходе ОУ (рис. 5.8, а) и на выходе автогенератора (рис. 5.8, б) с нанесенными координатными метками для определения периода колебаний генерируемых колебаний. Видно, что выходное напряжение автогенератора имеет гармоническую форму, в то время как на выходе ОУ форма колебания сильно искажена.

Временные метки на обеих осциллограммах показывают период вырабатываемых колебаний $T = 6,43$ мкс. Частота генерации $f_r = 1/T = 1/6,43 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 155,5$ кГц, несколько ниже расчетной частоты резонанса контура $f_p = 159,15$ кГц. Объяснение этого факта кроется в выполнении баланса фаз в автогенераторе. Вкратце дело в следующем: на рабочей частоте генератора (довольно высокая частота) ОУ вносит небольшой запаздывающий

фазовый сдвиг, который должен быть скомпенсирован за счет расстройки колебательного контура. В генераторе устанавливается более низкая частота, контур вносит положительный фазовый сдвиг, компенсирующий набег фазы в ОУ. Баланс фаз выполнен, генератор работает, но на несколько более низкой частоте.

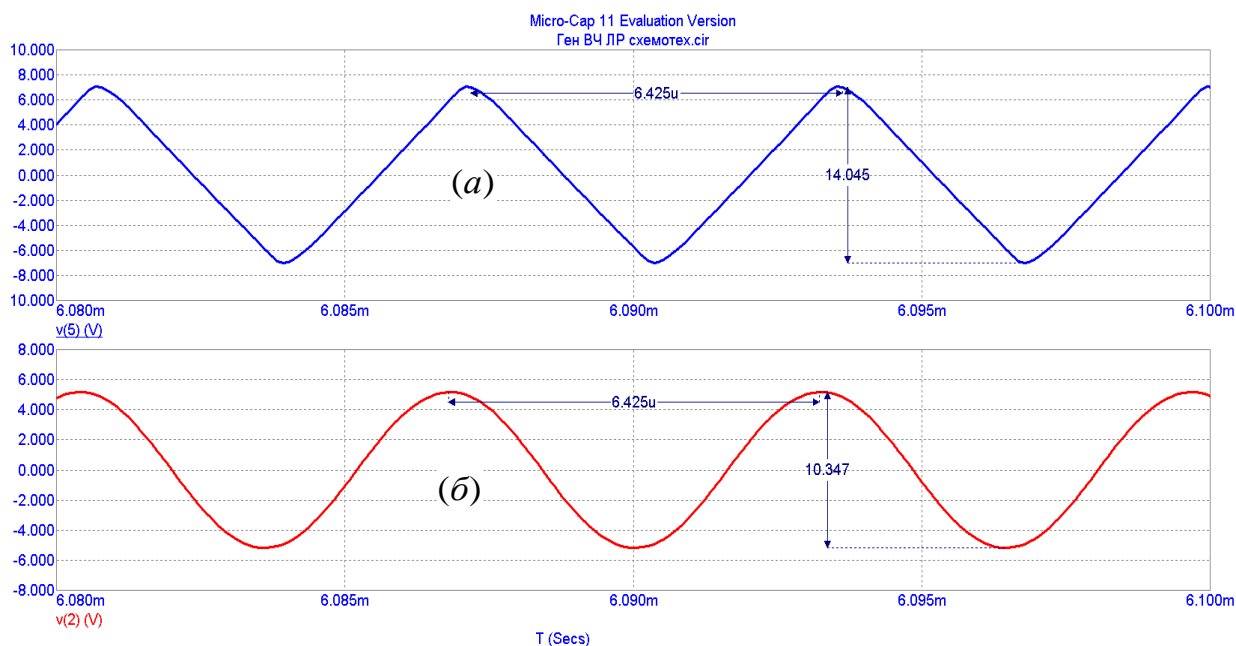


Рис. 5.8 — Осциллограммы колебаний:
а — на выходе операционного усилителя
и б — на выходе высокочастотного автогенератора

Примечание к пункту 5 «Результаты моделирования высокочастотного *LC*-автогенератора». В банке индивидуальных заданий на лабораторную работу фигурирует ряд типов (моделей) ОУ. Разумеется, они отличаются своими параметрами, что обуславливает различие условий запуска конкретного автогенератора. Поэтому установки в окне Transient Analysis Limits для изучения работы высокочастотного автогенератора могут отличаться от тех, которые приведены в примере выполнения работы (рис. 5.7).

В связи с этим желательно предварительно установить широкую панораму просмотра в окне Transient Analysis Limits (порядка 10 мс) и пронаблюдать процесс запуска генератора, а затем на стационарном участке работы вывести на экран для наблюдения требуемые 3—4 периода колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1 Шибаев А. А. Электротехника и электроника : учеб. пособие / А. А. Шибаев. — Томск : ФДО, ТУСУР, 2016. — 199 с.

2 Шибаев А. А. Схемо- и системотехника электронных средств : учеб. пособие / А. А. Шибаев. — Томск : Эль Контент, 2014. — 190 с.

3 Шибаев А. А. Общая электротехника : учеб. пособие / А. А. Шибаев. — Томск : Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. — 406 с. — ISBN 978-5-86889-355-1.

4 Шибаев А. А. Электротехника и электроника : учеб. пособие : в 2 ч. / А. А. Шибаев. — Томск : Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2010. — Ч.1. — 232 с.

5 Шибаев А. А. Электротехника и электроника : учеб. пособие : в 2 ч. / А. А. Шибаев. — Томск : Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2010. — Ч.2. — 168 с.

6 Шибаев А. А. Электротехника и электроника : учеб. метод. пособие / А. А. Шибаев. — Томск : Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2010. — 106 с.

7 MicroCap 11. Evaluation Version [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.spectrum-soft.com/demoform.shtml>

8 Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 [Электронный ресурс] / М. А. Амелина, С. А. Амелин. — URL :

http://fileskachat.com/file/24857_793ac8e6f4d131a5c9b8b5be330b3ae8.html.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Общие сведения о программе схемотехнического моделирования Micro-Cap

Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap имеет удобный, дружелюбный интерфейс и предъявляет достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам персонального компьютера. Однако предоставляемые при этом возможности достаточно велики. В версии Micro-Cap 11 Evaluation (Demo) программа доступна для скачивания по ссылке <http://www.spectrum-soft.com/demoform.shtml>.

Micro-Cap позволяет анализировать не только аналоговые и цифровые устройства, но также проводить смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств.

Интуитивно понятный интерфейс, нетребовательность к вычислительным ресурсам персонального компьютера и большой спектр возможностей послужили основой популярности Micro-Cap среди радиолюбителей, студентов и преподавателей электроники.

Алгоритм работы включает в себя создание электрической цепи в графическом редакторе, задание параметров анализа и изучение полученных данных. Программа самостоятельно составляет уравнения цепи и проводит моментальный расчёт. Любое изменение схемы или параметров элементов приводит к автоматическому обновлению результатов.

Графический редактор опирается на библиотеки электронных компонентов, которые можно пополнять на основе экспериментальных или справочных данных с помощью встроенного модуля Shape Editor. Все номиналы и параметры элементов могут быть как неизменными, так и зависящими от температуры, времени, частоты, состояния схемы, параметров других компонентов. Анимированные детали (светодиоды, реле, семисегментные

индикаторы и некоторые другие элементы) изменяют состояние в соответствии с поступающими на них сигналами.

Моделирование включает в себя целый набор различных анализов: переходных процессов, передаточных характеристик по постоянному току, малосигнальных частотных характеристик, чувствительностей по постоянному току, нелинейных искажений, метода Монте-Карло и многих других.

Опытные пользователи могут создавать свои макромодели, которые облегчают имитационное моделирование без потерь информации. Допускается одновременно использовать различные стандарты элементов схемы. Из недостатков можно отметить лишь необходимость установки дополнительных элементов, так как объем библиотек Micro-Cap иногда недостаточен.

Возможности графического редактора схем

– Построение принципиальных и функциональных электрических схем при помощи встроенного графического редактора с использованием библиотеки условных графических обозначений (УГО) электронных компонентов, а также создание собственных УГО с помощью встроенного редактора УГО Shape Editor.

– Номиналы элементов и параметры моделей компонентов могут быть как постоянными, так и выражаться с помощью математических функций через параметры других элементов, состояния схемы (напряжения в узлах или токи через элементы), а также зависеть от температуры, времени и частоты.

– Использование для повышения наглядности анимированных элементов (светодиоды, семисегментные индикаторы, измерители уровня, реле, переключатели и др.), которые изменяют свое состояние непосредственно в режиме анализа схемы в соответствии с поступающими на них управляющими сигналами или действиями пользователя.

- Нанесение текстовых надписей на поле принципиальной схемы, добавление к принципиальной схеме рамки и штампа с основными сведениями о схеме, построение различных геометрических фигур, используемых для выделения законченных функциональных блоков.

- Размещение на поле принципиальной схемы (или в специальном текстовом окне) текстовых директив управления моделированием, задания параметров моделей, задания глобальных параметров моделирования.

- Возможность отображения номеров узлов принципиальной схемы, присваиваемых графическим редактором при вводе схемы.

- Возможность выбора показываемых атрибутов компонента электронной схемы: номинального значения, наименования выводов, позиционного обозначения, параметров и имени макромоделей, пользовательских атрибутов и пр.

- Возможность показа концов выводов компонентов для выявления отсутствия соединения между ними.

- Использование координатной сетки с различным шагом, показ которой можно включать/отключать.

- Возможность использования «растягивающихся проводов», не нарушающих электрические соединения при перемещении компонентов принципиальной схемы.

- Возможность поиска компонента на принципиальной схеме по заданному признаку, расстановка меток (флагов) на принципиальной схеме большого размера для быстрой навигации по схеме, масштабирование изображения принципиальной схемы на экране (увеличение, уменьшение).

- Возможность изменения цветовых и шрифтовых параметров отображения элементов схем отдельно по элементам или перед началом ввода для всей принципиальной схемы.

Моделирование

Transient Analysis — анализ переходных процессов в схемах при подаче напряжения питания и (или) воздействия (воздействий) произвольной формы с построением графиков переменных состояния схемы и их функций: зависящих от времени; зависящих друг от друга; разложенных в ряд Фурье по гармоническим составляющим.

AC Analysis — анализ малосигнальных частотных характеристик схемы (линеаризованной в окрестности режима по постоянному току при воздействии на нее одного или нескольких источников гармонического сигнала с постоянной амплитудой и меняющейся частотой. При этом возможен вывод следующих графиков: зависимости комплексных значений переменных состояния (амплитуда, фаза, групповая задержка) от частоты в линейном, логарифмическом масштабах; зависимости составляющих комплексных величин переменных состояния друг от друга (например, построение годографа); зависимости спектральных плотностей напряжений шума, приведенных к указанным входному и выходному узлам, от частоты.

DC Analysis — анализ передаточных характеристик по постоянному току. Возможно проведение анализа при изменении двух входных переменных, что позволяет строить на графике семейства характеристик устройства (например, семейство выходных характеристик биполярного транзистора).

Dynamic DC Analysis — динамический анализ схемы по постоянному току с отображением на схеме (по выбору) напряжений, токов, мощностей, состояний полупроводниковых приборов при «ручном» изменении величин источников ЭДС, тока, сопротивлений резисторов.

Dynamic AC Analysis — динамический малосигнальный анализ схемы по переменному току (линеаризованной в окрестности рабочей точки по постоянному току) с показом на схеме величин комплексных переменных состояния схемы при различных частотах (задаваемых списком) при

«ручном» изменении величин пассивных компонентов (резисторы, индуктивности, конденсаторы).

Sensitivity Analysis — расчет чувствительностей в режиме по постоянному току. В этом режиме рассчитываются чувствительности одной или нескольких выходных переменных к изменению одного или нескольких входных параметров (частные производные по входным параметрам). В качестве входных изменяемых параметров для этого вида анализа могут выступать все параметры моделей, величины пассивных компонентов, символьные параметры.

Transfer Function Analysis — расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току. Рассчитывается отношение измеренного изменения заданного пользователем выходного выражения к вызвавшему это изменение малому возмущению заданного пользователем входного источника постоянного напряжения (тока). При этом автоматически рассчитываются входное (относительно клемм входного источника) и выходное (относительно узлов выходного напряжения) сопротивления схемы на постоянном токе.

Distortion Analysis — расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа. Фактически в этом режиме запускается анализ переходных процессов при гармоническом воздействии на входе схемы и используются функции спектрального анализа для выходной переменной для расчета нелинейных искажений.

Probe Analysis — использование графического постпроцессора PROBE, позволяющего получать различные характеристики моделируемой схемы без перезапуска того или иного вида анализа.

Stepping — многовариантный анализ, при котором могут изменяться номиналы простых компонентов, величины параметров моделей компонентов, значения символьных переменных с линейным и логарифмическим

шагом с возможностью выбора одновременного изменения до 20 параметров или организации до 20 вложенных циклов. Имеется возможность автоматической подписи на выходных графиках каждого варианта анализа. При использовании многовариантного анализа актуально 3D-моделирование, вызываемое из меню применяемого вида анализа. При этом по оси Z откладывается значение варьируемого параметра и в пространстве строится поверхность, на которой лежат все кривые многовариантного анализа.

Performance Window — возможность построения графиков зависимости определенного ряда характеристик функций схемы (функции Performance), таких как длительность нарастания/спада импульса, глобальный или локальный максимумы/минимумы, значение функций в заданных точках, ширина импульса по заданному уровню, период или частота колебаний и т. п. (всего имеется 23 функции Performance), от значения варьируемого параметра компонента или модели при многовариантном анализе.

Optimize — параметрическая оптимизация схемы путем подбора номиналов или параметров модели указанных компонентов для достижения заданных значений функций Performance.

Monte-Carlo — многовариантный анализ Монте-Карло при статистическом разбросе параметров компонентов с возможностью вывода гистограмм распределения характеристик заданной функции по интервалам значений.

Основные возможности обработки результатов анализа

- Панорамирование (протаскивание) активного окна графиков с помощью правой клавиши мыши; широкие возможности масштабирования полученных графиков.
- Нанесение расстояния по горизонтали и по вертикали между двумя wybranными точками графика, а также значений функций, отображенных на графике, в любой точке.

- Нанесение на график текстовых надписей в относительных (относительно графика выходной переменной) и абсолютных координатах.
- Управление параметрами графических окон (цвет, толщина и тип линий координатной сетки и графиков, цвет, тип и размер шрифтов для текстовой информации, цвет окна, цвет заднего фона и т. п.). Возможность нанесения на графики специальных значков для их идентификации в режиме черно-белой печати.
- Задание различных способов нормирования графиков.
- Возможность синхронного перемещения курсоров по всем графическим окнам.
- Перемещение курсоров в точки с заданными свойствами, выбранными с помощью функций Performance.

В помощь к разрешению любых проблем, связанных с работой в Micro-Cap, в сети Интернет доступна книга авторов М. А. Амелиной и С. А. Амелина «Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap» [8].