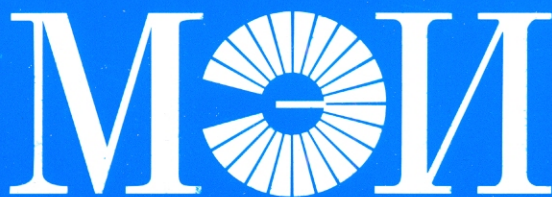


УДК 621.3
К 559



А.Т. Кобяк, Н.Р. Новикова,
А.А. Титов

**Применение программы
схемотехнического моделирования
Design Lab 8.0 для решения
задач по электротехнике**

Методическое пособие

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

КОБЯК А.Т., НОВИКОВА Н.Р., ТИТОВ А.А.

**Применение программы
схемотехнического моделирования
Design Lab 8.0
для решения задач по электротехнике**

Методическое пособие по курсу «Электротехника»
для студентов, обучающихся по направлению
Информатика и вычислительная техника

Под редакцией А.Т. Кобяка

Москва
Издательство МЭИ
2015

УДК 621.3
К 559

Утверждено учебным управлением МЭИ
Подготовлено на кафедре электрофизики информационных систем
Рецензент: канд.техн.наук, профессор Геворкян В.М.

Кобяк А.Т.

К 559 Применение программы схемотехнического моделирования Design Lab 8.0 для решения задач по электротехнике: Методическое пособие / А.Т. Кобяк, Н.Р. Новикова, А.А. Титов; под ред. А.Т. Кобяка. –М.: Издательство МЭИ, 2015. – 40 с.

В пособии рассматриваются вопросы применения системы сквозного проектирования Design Lab 8.0 в учебном курсе электротехники, приведены примеры и методические рекомендации, позволяющие адаптироваться к данной системе.

В пособии в систематизированном виде изложен необходимый справочный материал, иллюстрируемый примерами.

Методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника», а также инженерно-технических работников, занимающихся схемотехническим проектированием в области автоматики, измерительной техники и электротехники.

УДК 621.3

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач по электротехнике традиционными методами для студентов, начинающих изучение электротехники, с помощью бумаги и ручки представляет определенные трудности. Помогут в этой проблеме программы схемотехнического моделирования [1,...,5], нашедшие применение как в промышленности при разработке схем, так и в учебном процессе. Для студентов такие программы могут служить домашней электротехнической лабораторией, с помощью которой можно рассчитать, посмотреть, проанализировать цепи практически любой сложности. С их помощью можно получить для конкретной задачи правильный ответ, выполнить подготовку к лабораторной работе, а то и саму работу.

В настоящее время существует целый ряд моделирующих программ, но практически все они созданы на основе *SPICE*, которая была разработана специалистами университета Беркли [7]. *PSPICE* считается образцом имитатора и используется электронщиками во всем мире чаще, чем все остальные моделирующие программы вместе взятые.

Настоящее методическое пособие является переработанной редакцией ранее выпущенного [6]. Из пособия исключены описания интерфейсов программ *Schematics* и *Probe*, так как студент может воспользоваться и другими системами схемотехнического моделирования, например [1,2,3,4,5]. Основное же внимание уделено применению таких программ при изучении электротехнических дисциплин.

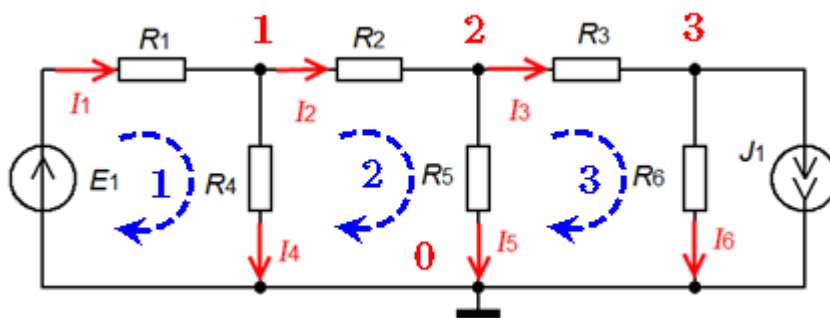
Все примеры строятся на основе редактора проектирования электронных схем *Schematics*, разработанной фирмой *MicroSim*. Данный редактор, как показала практика, легче усваивается, и он более удобен по сравнению с другими редакторами, например, *Capture*, применяемой в системе *OrCAD* [8]. Демоверсию программы *DesignLab 8.0* можно скачать с сайта кафедры ЭФИС [<http://efis.mpei.ru>].

В пособии приведены примеры расчета цепей с постоянными, синусоидальными и импульсными источниками и особенности их моделирования в системе *DesignLab 8.0*.

1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В качестве примера расчета цепей постоянного тока рассмотрим следующую задачу, решив её несколькими методами.

Задача 1. Для схемы (рис. 1.1) рассчитать ток I_2 при следующих параметрах схемы.



$E_1=10$ В,
 $J_1=10$ мА,
 $R_1=700$ Ом,
 $R_2=800$ Ом,
 $R_3=300$ Ом,
 $R_4=800$ Ом,
 $R_5=200$ Ом,
 $R_6=900$ Ом.

Рис. 1.1

Задачу решим несколькими методами, а затем проконтролируем решение с помощью программы моделирования.

Классический метод с использованием законов Кирхгофа

Для решения этим методом выполним следующие действия.

1. Обозначим токи во всех ветвях (выбор направления – произвольный, численное решение покажет на правильность выбора направления);
2. Обозначим цифрами узлы схемы: 0, 1, 2, 3. Выбираем узел с номером 0 в качестве базового. Потенциал этого узла принимаем равным нулю и его заземляем, как, например, показано на рис. 1.1;
3. Для выбранных узлов составляем три уравнения по первому закону Кирхгофа.

$$\text{Для узла 1:} \quad I_1 = I_2 + I_4, \quad (1.1)$$

$$\text{Для узла 2:} \quad I_2 = I_3 + I_5, \quad (1.2)$$

$$\text{Для узла 3:} \quad I_3 = I_6 + J_1. \quad (1.3)$$

4. По второму закону Кирхгофа составляем три уравнения по числу независимых контуров, выбрав направление обхода, например, по часовой стрелке, как показано на рис. 1.1.

$$\text{Для контура 1:} \quad I_1 R_1 + I_4 R_4 = E_1, \quad (1.4)$$

$$\text{Для контура 2:} \quad I_2 R_2 + I_5 R_5 - I_4 R_4 = 0, \quad (1.5)$$

$$\text{Для контура 3:} \quad I_3 R_3 - I_5 R_5 + I_6 R_6 = 0. \quad (1.6)$$

Полученную систему уравнений можно решить, воспользовавшись известными математическими программами, например, MatCad или Mathematica. Решение же на бумаге, как показывает опыт работы со студентами, требует больших временных затрат и может привести к неправильному результату из-за невнимательности, арифметических ошибок или опечаток.

В результате численного решения для данных нашей задачи получим $I_2 = 4,922$ мА. Недостатком такого метода можно считать то, что для определения одного неизвестного (I_2) приходится решать систему из шести уравнений.

Метод узловых потенциалов

Для снижения числа исходных уравнений можно составить систему по методу узловых потенциалов.

$$\begin{aligned} \varphi_A (g_1 + g_2 + g_4) - \varphi_B g_2 &= E_1 g_1; \\ -\varphi_A g_2 + \varphi_B (g_2 + g_3 + g_5) - \varphi_C g_3 &= 0; \\ -\varphi_B g_3 + \varphi_C (g_3 + g_6) &= -J_1. \end{aligned}$$

Здесь $g_i = 1/R_i$ – соответствующие проводимости. В результате можно получить решение для потенциалов в узлах 1, 2 и 3, а затем определить искомый ток.

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2}.$$

Численное решение даст тот же самый результат: $I_2 = 4,922$ мА.

Метод наложения

При использовании метода наложения (или суперпозиции) искомый ток I_2 определяется как алгебраическая сумма токов от воздействия каждого источника в отдельности: $I_2 = I_{2E_1} + I_{2J_1}$, где I_{2E_1} и I_{2J_1} – составляющие тока от источника E_1 и J_1 .

Если оставить в схеме только источник напряжения E_1 , то остальные источники (J_1) надо приравнять нулю, что равносильно размыканию ветви с этим током (рис. 1.2).

Из схемы (рис. 1.2), применяя эквивалентные преобразования, можно найти

$$I_{2E_1} = \frac{E_1}{R_1 + R_4 \parallel (R_2 + (R_5 \parallel (R_3 + R_6)))} \cdot \frac{R_4}{R_4 + (R_2 + (R_5 \parallel (R_3 + R_6)))}.$$

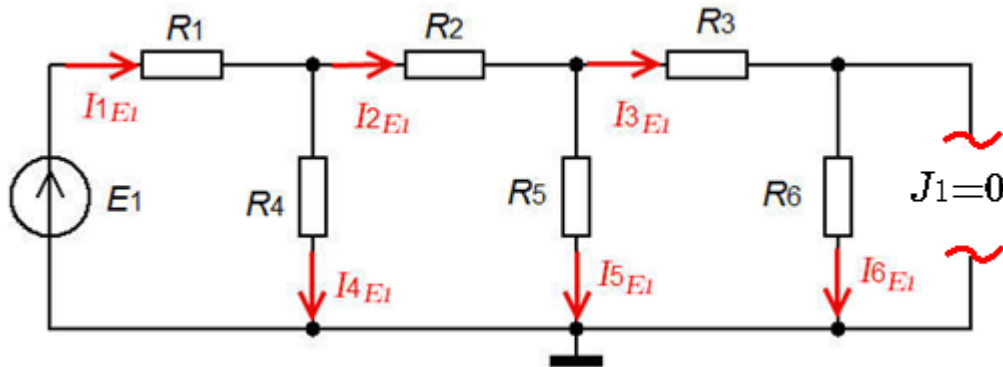


Рис. 1.2

Для нахождения составляющей тока от источника J_1 надо приравнять E_1 нулю, то есть источник заменяем его внутренним сопротивлением равным нулю. Для схемы – это равносильно замыканию источника E_1 (рис. 1.3).

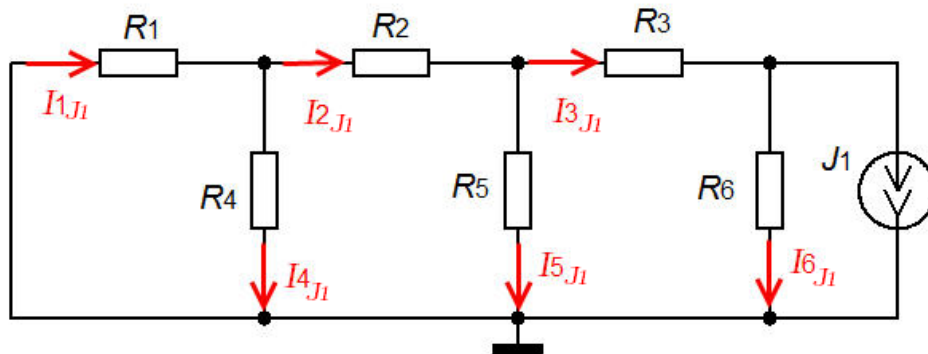


Рис. 1.3

Из схемы (рис. 1.3), применяя эквивалентные преобразования и формулу разброса, можно найти

$$I_{2J_1} = J_1 \frac{R_6}{R_6 + R_3 + (R_5 \parallel (R_2 + (R_1 \parallel R_4)))} \cdot \frac{R_5}{R_5 + (R_2 + (R_1 \parallel R_4))}.$$

Суммируя эти две составляющие, найдем ток $I_2 = I_{2E_1} + I_{2J_1}$. Численное решение даёт: $I_{2E_1} = 3,966 \text{ мА}$, $I_{2J_1} = 0,956 \text{ мА}$, $I_2 = 4,922 \text{ мА}$.

Метод эквивалентного генератора

Этот метод используется тогда, когда надо определить ток только в одной ветви сложной схемы, как и в нашей задаче. Согласно теореме об активном двухполюснике, любую сложную линейную схему относительно выбранной ветви можно заменить эквивалентным генератором (источником напряжения) с ЭДС, равным напряжению холостого хода на концах этой ветви, и внутренним сопротивлением, равным сопротивлению схемы относительно тех же узлов, если из схемы исключить все источники. В нашем случае заменяем всю схему (рис. 1.1), кроме ветви с резистором R_2 , активным двухполюсником (рис. 1.4).

В этом случае ток I_2 можно определить по простой формуле:

$$I_2 = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}} + R_2}.$$

Для определения параметров эквивалентного генератора ($E_{\text{ЭКВ}}$ и $R_{\text{ЭКВ}}$) в исходной схеме сначала необходимо найти напряжение холостого хода $U_{\text{ХХ}}$ относительно узлов А и В (рис. 1.5).

$$E_{\text{ЭКВ}} = U_{\text{АВ ХХ}} = E_1 \frac{R_4}{R_1 + R_4} + J_1 \frac{R_5 R_6}{R_3 + R_5 + R_6}.$$

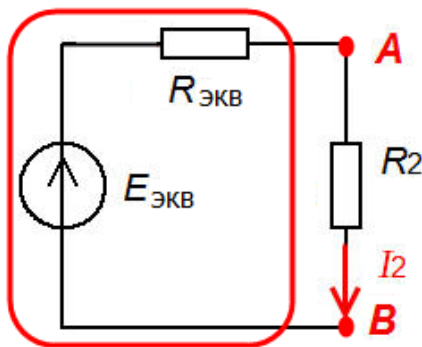


Рис. 1.4

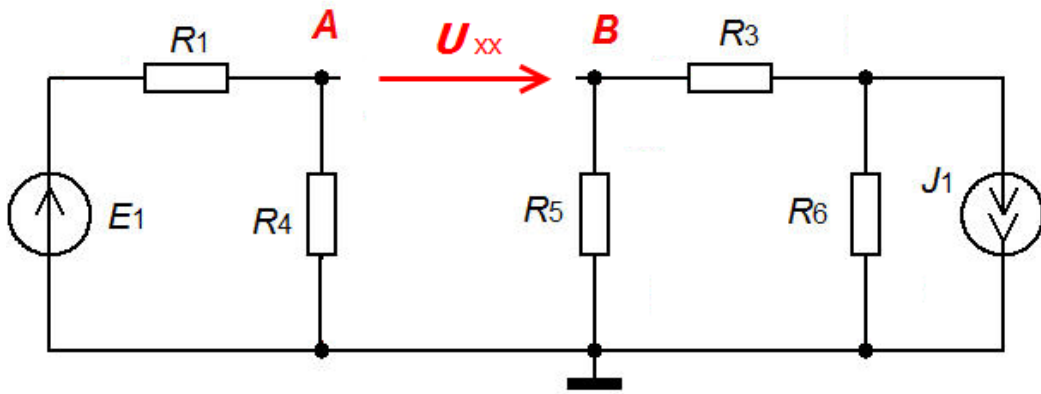


Рис. 1.5

Затем необходимо найти $R_{\text{экв}}$, которое равно входному сопротивлению схемы $R_{\text{вх}}$ относительно тех же узлов А и В, если исключить из схемы все источники (рис. 1.6).

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_5 (R_3 + R_6)}{R_3 + R_5 + R_6}.$$

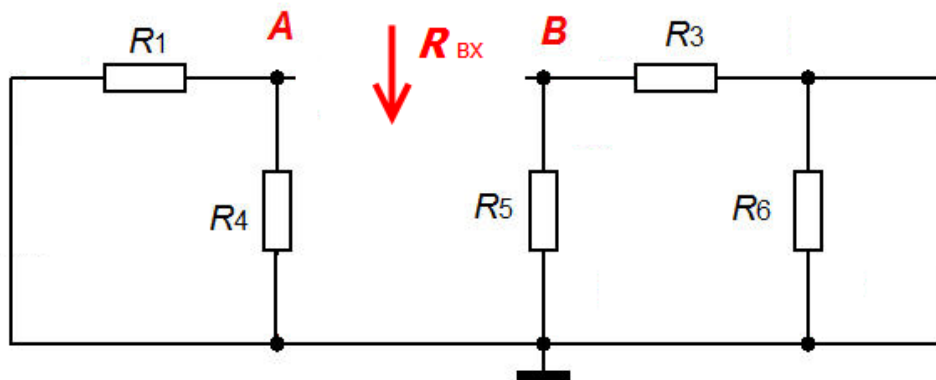


Рис. 1.6

Если топология схемы неизвестна, то эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}}$ можно найти через режим короткого замыкания, определив ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$. Например, в нашем случае необходимо замкнуть точки А и В (см. рис. 1.7).

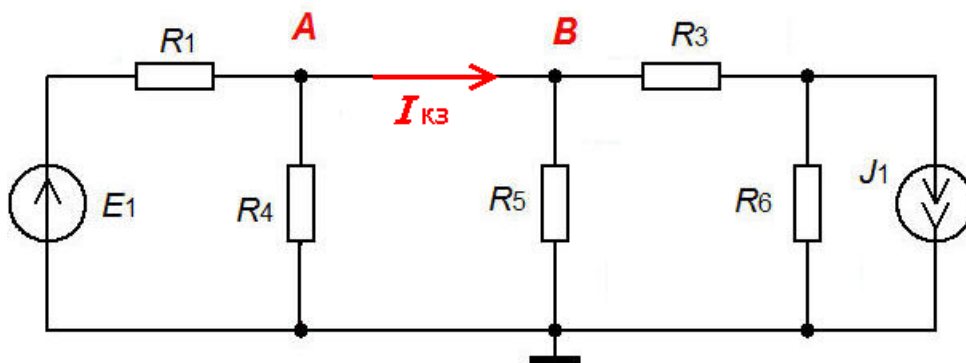


Рис. 1.7

Так как потенциалы точек А и В одинаковы, то по формуле двух узлов

$$\varphi_A = \varphi_B = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{J_1 R_6}{R_3 + R_6}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3 + R_6}}.$$

Тогда ток короткого замыкания $I_{кз}$ будет равен


$$I_{кз} = \frac{E_1 - \varphi_A}{R_1} - \frac{\varphi_A}{R_4}.$$


А эквивалентное сопротивление $R_{эКВ} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}.$



В результате численного решения получим $U_{эКВ} = U_{AB\ xx} = 6.619\ В,$
 $I_{кз} = 12.15\ мА,$ $R_{эКВ} = 545\ Ом,$ а ток $I_2 = 4,922\ мА.$

Моделирование схемы

Для сборки исходной схемы (рис. 1.1) в операционной системе «Windows» под управлением программы “Schematics” необходимо:

1. Открыть библиотеку элементов (команда *Draw – GetNewPart* или иконка ) и из нее вытянуть на рабочее поле все требуемые элементы. Искать нужные элементы удобно по их именам: источник постоянного напряжения – *VDC*, источник постоянного тока – *IDC*, резистор – *R*, земля – *EGND*.
2. Расположить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой, не соединяя их. Для изменения местоположения и ориентации элемента отметить его курсором мыши и щелкнуть левой кнопкой. Элемент окрасится. Отмеченный элемент можно повернуть (*Ctrl/R*), удалить (*Delete*) или переместить. В последнем случае отмеченный элемент захватить мышью и, нажав на левую кнопку, переместить в нужное место, после чего кнопку отпустить.
3. Соединить элементы на рабочем поле в соответствии с принципиальной схемой. Для этого курсор мыши перевести в режим рисования

соединительных линий (иконка  - карандаш с тонкой линией). Подвести карандаш к выводу одного из элементов и щелкнуть левой кнопкой (ЛК). Подвести карандаш к другой точке схемы и снова щелкнуть ЛК. И так далее. Для отмены режима рисования щелкнуть правой кнопкой.

4. Для изменения обозначения дважды щелкнуть на условное имя элемента, и в выплывшем окне откорректировать его.
5. Установить параметры резисторов и источников. Для этого дважды щелкнуть на значение параметра и в выплывшем окне установить требуемое значение параметра.
6. Сохранить схему в рабочей папке, например, D:\Student\name, где name – любое имя. *Внимание: Имя папки и файла не должно содержать русских букв.*
7. Запустить схему на расчет (F11).
8. Включить отображение результатов расчета схемы по постоянному току:
9. С помощью иконки  на схеме отображается ток (величина и направление) во всех элементах схемы;
10. С помощью иконки  на схеме отображаются потенциалы всех узлов схемы относительно общего (заземленного) узла.

В результате моделирования получим интересующие нас параметры (рис. 1.8). Можно видеть, что результаты моделирования совпадают с результатами ручного расчета схемы классическим методом и методом узловых потенциалов.

При моделировании схемы методом наложения (суперпозиции) в схеме (рис. 1.8) необходимо или разомкнуть источник тока (рис. 1.9), или удалить источник э.д.с. (рис. 1.10). Видно, что результаты ручного расчета методом наложения и моделирования совпадают с точностью до третьего знака.

При моделировании схемы методом эквивалентного генератора для создания режима холостого хода из схемы удаляется резистор R_2 (рис. 1.11).

Напряжение $U_{AB\text{xx}} = \varphi_A - \varphi_B = 5.333 - (-1.286) = 6.619 \text{ В}$, что совпадает с результатом ручного расчета.

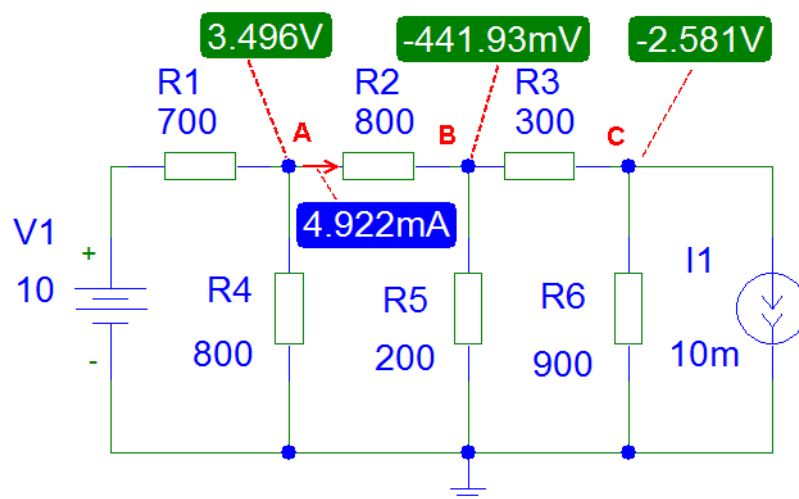


Рис. 1.8

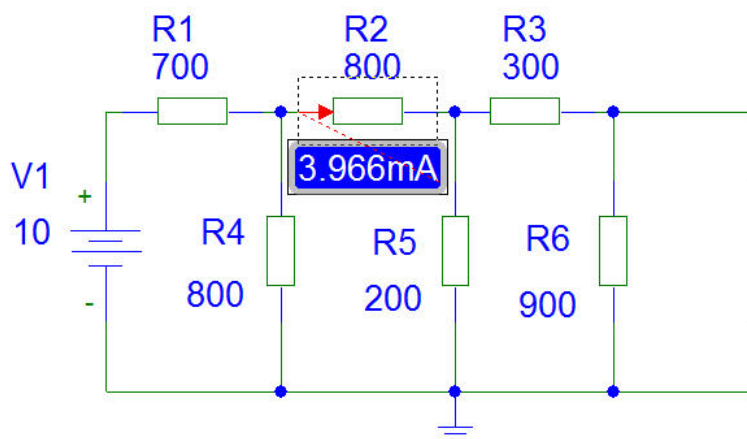


Рис. 1.9

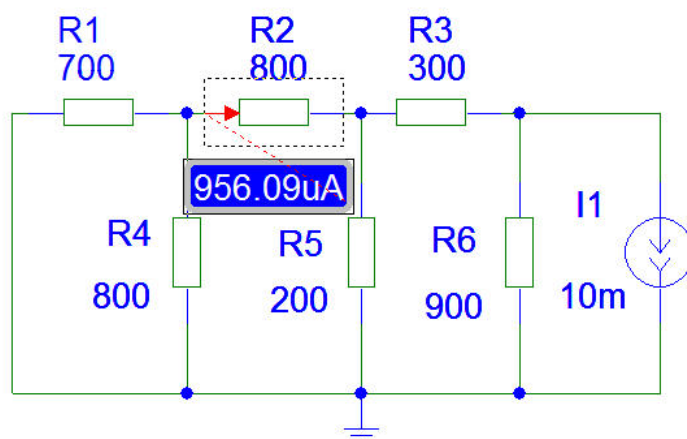


Рис. 1.10

Для моделирования короткого замыкания вместо резистора R_2 необходимо включить амперметр постоянного тока $IPROBE$ (рис. 1.12), который и определит ток.

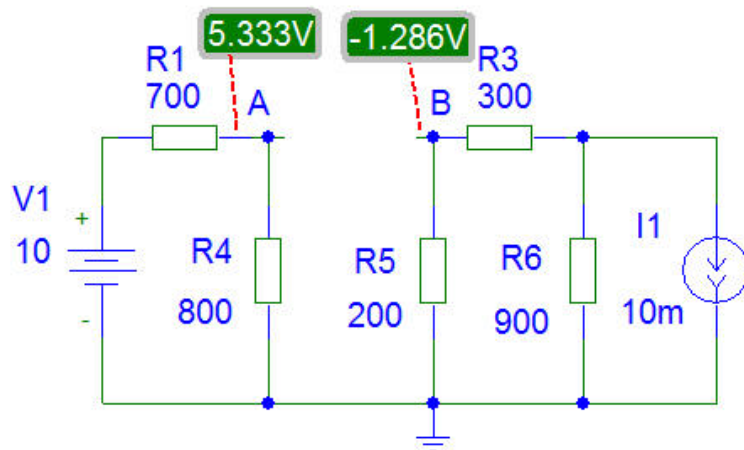


Рис. 1.11

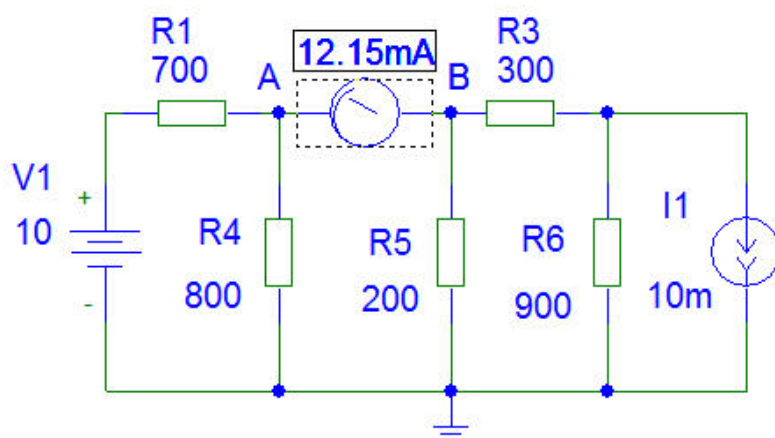


Рис. 1.12

Видно, что результаты ручного расчета и моделирования совпадают. И, наконец, создаётся схема эквивалентного генератора (рис. 1.13).



Рис. 1.13

Ток, измеренный в схеме (рис. 1.14), совпадает с током I_2 в исходной схеме (рис. 1.8), что экспериментально подтверждает теорему об эквивалентном преобразовании схемы в активный двухполюсник.

2. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В качестве примера рассмотрим следующую задачу.

Задача 2. Для схемы (рис. 2.1) рассчитать напряжение на конденсаторе $C1$ в установившемся режиме и построить график зависимости напряжения на конденсаторе $C1$ от времени в установившемся режиме.

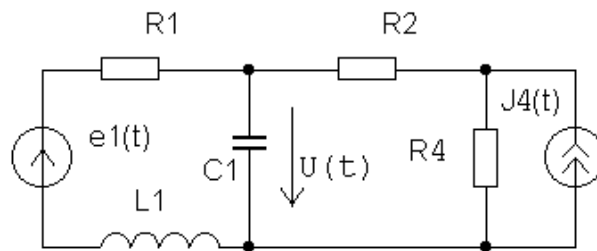


Рис. 2.1.

Исходные данные:

$R_1 = 500 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $R_4 = 1 \text{ кОм}$, $C_1 = 79,6 \text{ нФ}$, $L_1 = 160 \text{ мГн}$,
 $e_1(t) = E_0 + E_m \sin \omega t = 1 + 2 \sin \omega t$, $J_4(t) = J_0 + J_m \sin 3\omega t = 2 + 2 \sin 3\omega t$,
 $\omega = 2\pi f$, $f = 1 \text{ кГц}$, где $e_1(t)$ в В; $J_4(t)$ в мА.

Данную задачу надо решать методом суперпозиции, так как в схеме присутствуют источники разных типов: постоянные и синусоидальные с различными частотами.

Расчет схемы по постоянному току

В этом случае исходная схема (рис. 2.1) преобразуется в схему, показанную на рис. 2.2.

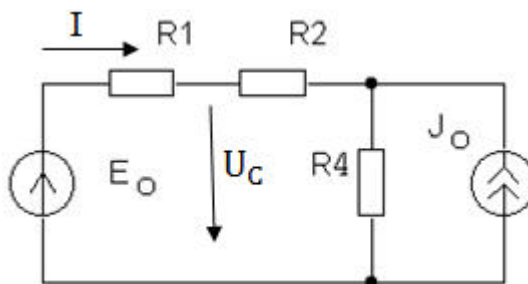


Рис. 2.2.

Исходные данные:

$R_1 = 500 \text{ Ом}$; $R_2 = 500 \text{ Ом}$; $R_4 = 1 \text{ кОм}$; $E_0 = 1 \text{ В}$; $J_0 = 2 \text{ мА}$.

Напряжение на конденсаторе $U_C = E_0 - IR_1$, где ток I , найденный методом наложения, равен:

$$I = \frac{E_0}{R_1 + R_2 + R_4} - J_0 \frac{R_4}{R_1 + R_2 + R_4} = \frac{1}{0.5 + 0.5 + 1} - 2 \frac{1}{0.5 + 0.5 + 1} = -0.5 \text{ мА}.$$

Тогда $U_C = E_0 - IR_1 = 1 + 0.5 \cdot 0.5 = 1.25 \text{ В}.$

Расчет схемы по переменному току

Расчет для первой гармоники. В этом случае исходная схема (см. рис. 2.1) преобразуется к схеме, показанной на рис. 2.3.

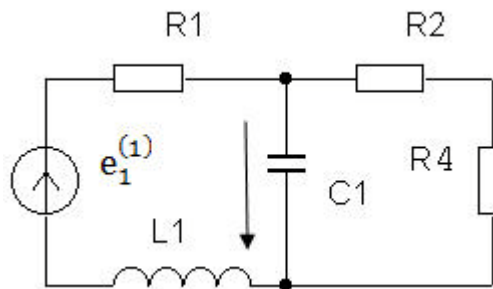


Рис. 2.3

Исходные данные:

$R_1=500 \text{ Ом}, \quad R_2=500 \text{ Ом}, \quad R_4=1 \text{ кОм}, \quad C_1=79,6 \text{ нФ}, \quad L_1=160 \text{ мГн},$
 $e_1^{(1)}(t) = E_m \sin \omega t = 2 \sin \omega t, \quad \omega=2\pi f, \quad f=1 \text{ кГц}.$

В источнике тока отсутствует первая гармоника, поэтому в схеме (рис. 2.3) остается только источник ЭДС. Рассчитаем схему, используя метод комплексных амплитуд.

Определим комплексные сопротивления индуктивности и конденсатора.

$$Z_L^{(1)} = j\omega L = j2\pi 1000 \cdot 0.160 = j1000 \text{ Ом} = j1 \text{ кОм}.$$

$$Z_C^{(1)} = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi 1000 \cdot 79,6 \cdot 10^{-9}} = -j2000 \text{ Ом} = -j2 \text{ кОм}.$$

Определим ток в конденсаторе, воспользовавшись формулой разброса.

$$I_{Cm}^{(1)} = E_{1m}^{(1)} \frac{R_2 + R_4}{(R_2 + R_4)Z_C + (R_1 + Z_L)(R_2 + R_4 + Z_C)} = 0.807 e^{j42,1^\circ} \text{ мА}.$$

Тогда комплексное максимальное значение напряжения на конденсаторе при действии первой гармоники равно:

$$U_{Cm}^{(1)} = I_{Cm}^{(1)} Z_C^{(1)} = 1.613 e^{-j47,93^\circ} \text{ В}.$$

Для временной области $u_C^{(1)}(t) = 1.613 \sin(\omega t - 47,93^\circ) \text{ В}.$

Расчет схемы для третьей гармоники. Для этого случая исходная схема (рис. 2.1) преобразуется к схеме, показанной на рис. 2.4.

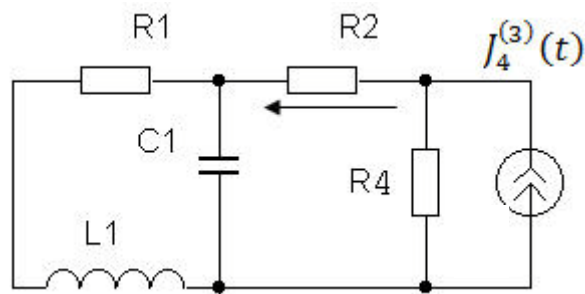


Рис. 2.4

Исходные данные:

$R_1=500 \text{ Ом}, \quad R_2=500 \text{ Ом}, \quad R_4=1 \text{ кОм}, \quad C_1=79,6 \text{ нФ}, \quad L_1=160 \text{ мГн},$
 $J_4^{(3)}(t) = J_m \sin 3\omega t = 2 \sin 3\omega t, \quad \omega = 2\pi f, \quad f = 1 \text{ кГц},$ где $J_4^{(3)}(t)$ в мА.

Определим комплексные сопротивления индуктивности и конденсатора.

$$Z_L^{(3)} = j3\omega L = 3Z_L^{(1)} = j3000 \text{ Ом} = j3 \text{ кОм}.$$

$$Z_C^{(3)} = -j \frac{1}{3\omega C} = \frac{Z_C^{(1)}}{3} = -j667 \text{ Ом} = -j0.667 \text{ кОм}.$$

Определим комплексное максимальное значение напряжения на конденсаторе при действии третьей гармоники. Для этого сначала найдем эквивалентное сопротивление конденсатора, включенного в параллель с резистором R_1 и катушкой индуктивности L_1 , которые включены последовательно.

$$Z_O^{(3)} = Z_C^{(3)} \parallel (R_1 + Z_L^{(3)}) = \frac{Z_C^{(3)} (R_1 + Z_L^{(3)})}{Z_C^{(3)} + R_1 + Z_L^{(3)}}.$$

$$Z_O^{(3)} = \frac{-j0.67(0.5 + j3)}{-j0.67 + 0.5 + j3} = 0.848 e^{j87,40^\circ} \text{ кОм} = (0,0385 - j0,847) \text{ кОм}.$$

Напряжение на конденсаторе определим так: $U_{Cm}^{(3)} = I_{2m}^{(3)} Z_O^{(3)}$,
 где ток $I_{2m}^{(3)}$ найдем по формуле разброса.

$$U_{Cm}^{(3)} = J_4^{(3)} \frac{R_4}{R_2 + R_4 + Z_O^{(3)}} Z_O^{(3)}.$$

$$U_{Cm}^{(3)} = 2 \frac{1}{0,5 + 1 + (0,0385 - j0,847)} 0,848 e^{j87,40^\circ} = 0,966 e^{-j58,56^\circ} \text{ В}.$$

Тогда для третьей гармоники временная зависимость запишется так:

$$u_C^{(3)}(t) = 0,966 \sin(3\omega t - 58,56^\circ) \text{ В}.$$

По принципу суперпозиции находим напряжение на конденсаторе от действия постоянной составляющей, первой и третьей гармоник.

$$u_C(t) = 1,25 + 1,613 \sin(\omega t - 47,93^\circ) + 0,966 \sin(3\omega t - 58,56^\circ) \text{ В}.$$

График напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и все его гармоники ($u_C^{(0)}(t)$, $u_C^{(1)}(t)$ и $u_C^{(3)}(t)$) показаны на рис. 2.5.

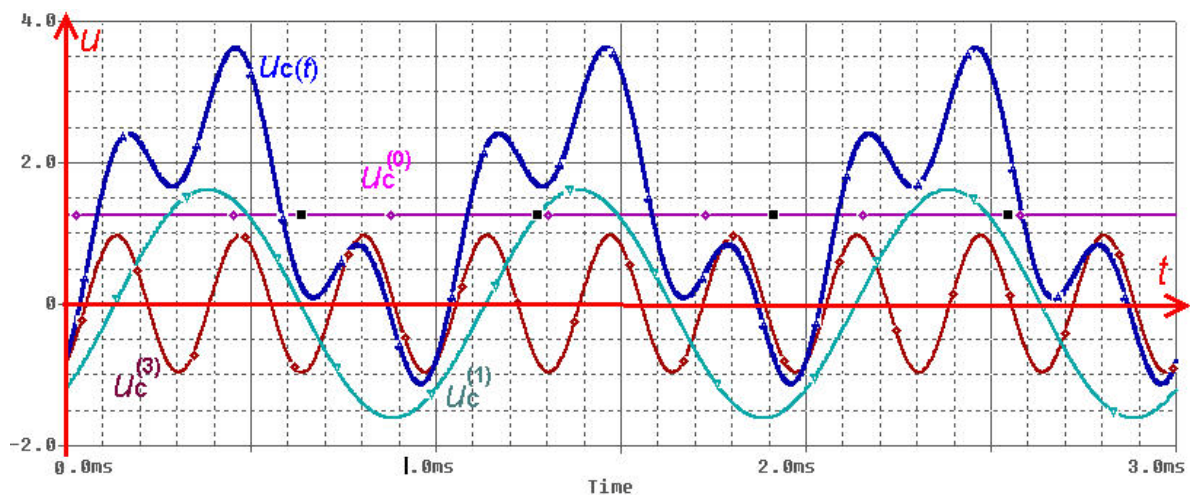


Рис. 2.5

Моделирование схемы

На этом примере можно продемонстрировать практически все основные режимы работы в системе **Design Lab 8.0**.

Решим сначала задачу в системе **Design Lab** методом суперпозиции. А затем покажем, как можно получить ответ на поставленный вопрос, рассчитав переходной процесс в исходной схеме.

Решение методом суперпозиции

Решение задачи для исходной схемы разбивается на три этапа: 1) расчет схемы по постоянному току; 2) расчет схемы для первой гармоники и 3) расчет схемы для третьей гармоники.

Моделирование схемы и ее расчет по постоянному току в системе DesignLab 8.0 проводится так же, как описано в главе 1. Результаты анализа схемы по постоянному току показаны на рис. 2.6.

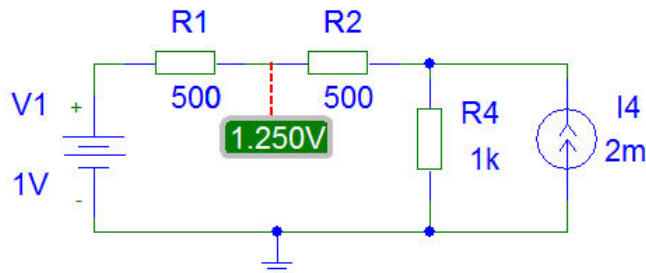


Рис. 2.6

Таким образом, постоянная составляющая напряжения на конденсаторе равна $U_C^{(0)} = 1,25V$, что совпадает с ручным расчетом.

Моделирование схемы с синусоидальными источниками и ее расчет для первой гармоники. Чтобы решить поставленную задачу, необходимо преобразовать схему рис. 2.6.

1. Удаляем источник напряжения и источник тока.
2. Из библиотеки элементов выбираем емкость C , индуктивность L и источник напряжения VAC , специально предназначенный для расчета схем в частотной области, и устанавливаем позиционные обозначения и параметры для индуктивности $L_1 = 160$ мГн и для конденсатора $C_1 = 79,6$ нФ.
3. Для источника устанавливаем его параметры. Для этого, дважды щелкнув по источнику, в открывшемся диалоговом окне записываем параметры в соответствии с исходными данными (рис. 2.7).
4. Для удобства последующей обработки результатов **пронумеруем (пометим) узел соединения резисторов R_1 , R_2 и конденсатора C_1** . Для этого выделим любой проводник, подходящий к этому узлу, двойным щелчком. Он окрасится в красный цвет, и появится диалоговое окно **Label**. В его поле запишем метку узла, например 1 (рис. 2.8).

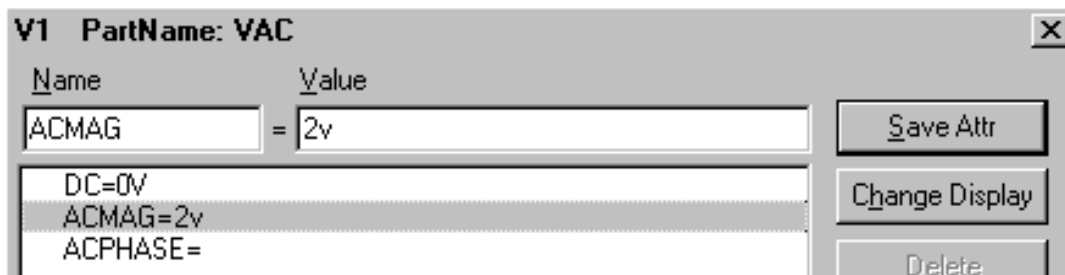


Рис. 2.7

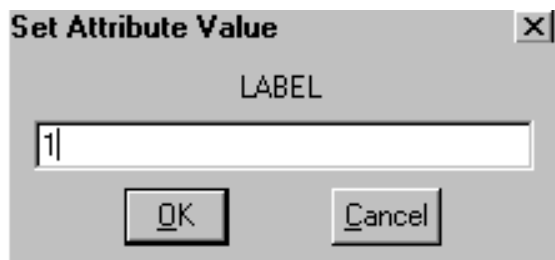


Рис. 2.8

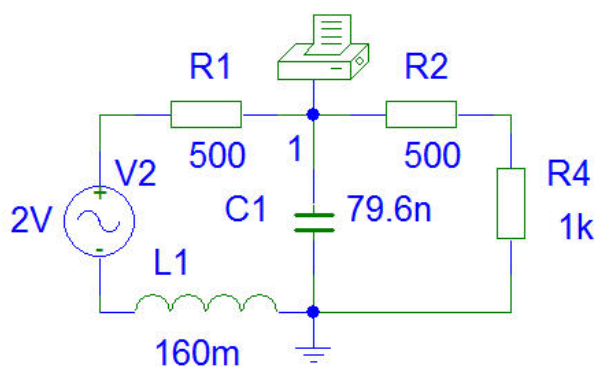


Рис. 2.9

5. В схему **включаем маркер VPRINT1** (рис. 2.9), который обеспечивает вывод результатов расчета комплексного потенциала узла 1 в табличном виде в выходной файл. В диалоговом окне **VPRINT1** задаем нужные параметры: **AC=Yes, MAG=Yes, PHASE=Yes, REAL=Yes, IMAG=Yes** (рис. 2.10).
6. **Изменяем режим анализа** с помощью команды *Analisis / Setup*. Отменяем расчет по постоянному току **Bias Point Detail** и задаем параметры частотного анализа. Нажимаем курсором на клавишу **AC Sweep** и в открывшемся окне задаем: линейное изменение частоты (**Linear**), число расчетных точек (**Total Pts. =1**), начальную частоту расчета (**Start Freq=1k**) и конечную частоту расчета (**End Freq=1k**), как показано на рис. 2.11.

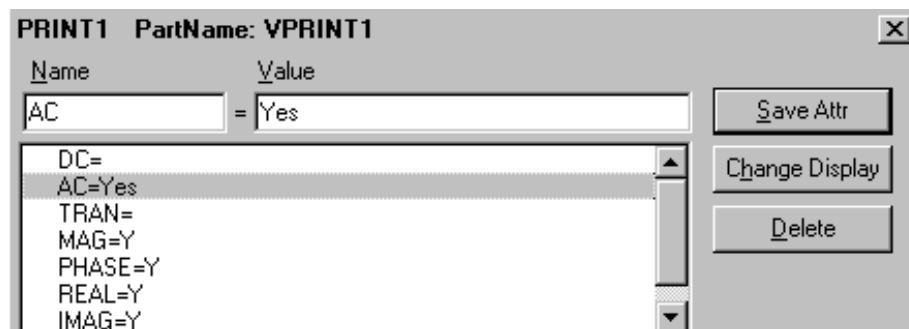


Рис. 2.10

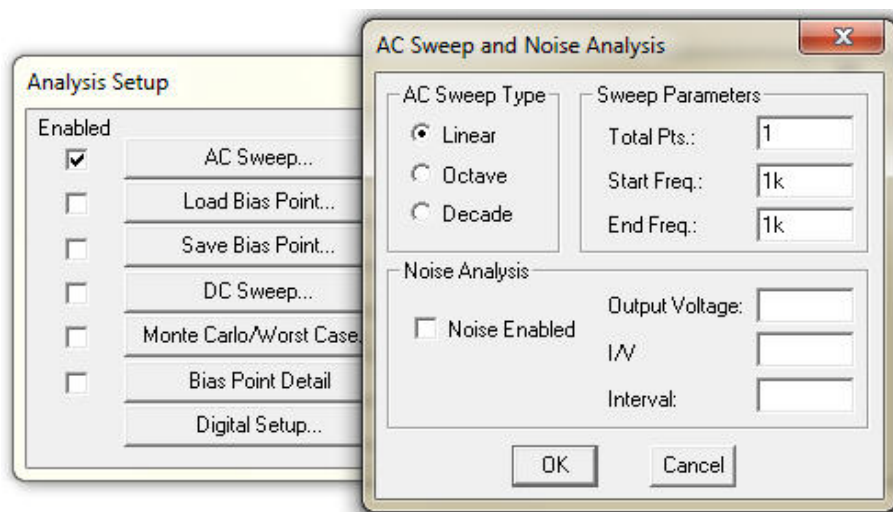


Рис. 2.11

7. Рекомендуется *сохранить схему* под новым именем.
8. Так как в данном случае нас интересует решение только на единственной частоте 1кГц, то рекомендуется отключить графический постпроцессор **Probe** с помощью команды *Analysis / Probe Setup...*, установив режим **Do not auto Probe**.
9. Запускаем задачу на решение (*Analysis/Simulate* или **F11**) и после завершения работы программы **PSpice** открываем выходной файл с помощью команды *Analysis / Examine Output*.

С помощью прокрутки находим результат решения схемы в частотной области:

| FREQ | VM(1) | VP(1) | VR(1) | VI(1) |
|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 1.000E+03 | 1.613E+00 | -4.793E+01 | 1.081E+00 | -1.198E+00 |

Здесь: FREQ - частота сигнала всех источников; VM – амплитуда гармонических составляющих напряжения в узле 1; VP – фаза гармонических составляющих напряжения [град]; VR – действительная часть напряжения; VI – мнимая часть напряжения.

Воспользовавшись таблицей, получаем решение для первой гармоники:

$$\dot{U}_{1m}^{(1)} = 1,613 e^{-j 47,93^\circ} = 1,081 - j1,198 \text{ [В]},$$

или для мгновенных значений:

$$u_1^{(1)}(t) = 1,613 \sin(\omega t - 47,93^\circ) \text{ В.}$$

Расчет схемы для третьей гармоники. Для этого случая схему, смоделированную на предыдущем этапе (рис. 2.9), необходимо отредактировать для новых условий.

1. В схеме (рис. 2.9) удаляем источник напряжения V_1 и соединяем R_1 с L_1 .
2. В схему добавляем источник тока IAC, специально предназначенный для расчета схем в частотной области. Обратите внимание на полярность включения источника - *ток внутри источника направлен от "+" к "-"*. Устанавливаем параметры этого источника так, как показано на рис. 2.12.

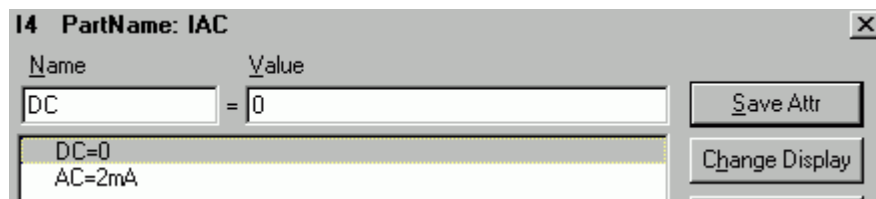


Рис. 2.12

3. Для режима частотного анализа *AC Sweep* (рис. 2.11) меняем начальную и конечную частоту расчета на 3кГц (*Start Freq=3k, End Freq=3k*).

В результате получим рабочую схему (рис. 2.13) для расчета третьей гармоники.

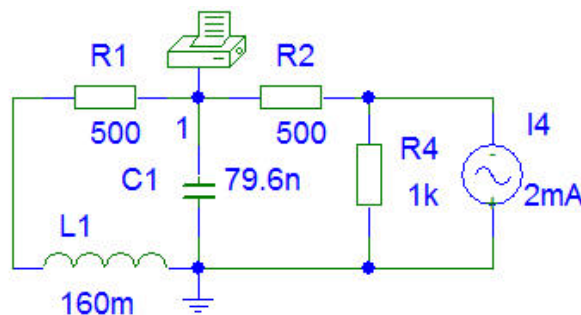


Рис. 2.13

Рекомендуется сохранить схему под новым именем.

Запускаем задачу на решение, после чего в выходном файле по команде **Analysis / Examine Output** ищем результаты расчета для частоты 3кГц.

| FREQ | VM(1) | VP(1) | VR(1) | VI(1) |
|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 3.000E+03 | 9.659E-01 | -5.855E+01 | 5.039E-01 | -8.240E-01 |

Из таблицы можно определить решение для третьей гармоники:

$$\dot{U}_{1m}^{(3)} = 0,966 e^{-j58,6^\circ} = 0,504 - j0,824$$

или для мгновенных значений:


$$u_1^{(1)}(t) = 0,966 \sin(3\omega t - 58,6^\circ) \text{ В.}$$

В результате расчетов напряжение на конденсаторе равняется сумме постоянной составляющей, первой и третьей гармоник:

$$u_C(t) = 1,25 + 1,613 \sin(\omega t - 47,93^\circ) + 0,966 \sin(3\omega t - 58,49^\circ) \text{ В.}$$

Расчет переходного процесса для полной схемы

Преобразуем схему для расчета переходного процесса.

1. Удаляем элемент **VPRINT1** и заменяем его маркером .
2. Источник тока **IAC** заменяем синусоидальным источником **ISIN**.
Внимание: необходимо соблюдать полярность включения!
3. Добавляем в схему синусоидальный источник напряжения **VSIN**. Схема будет иметь вид, показанный на рис. 2.14.

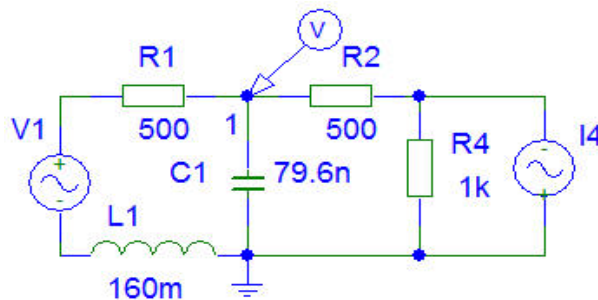


Рис. 2.14

4. Параметры источников зададим в соответствии с заданием, открыв диалоговые окна для **VSIN** и **ISIN** (рис. 2.15).
5. Изменим режим анализа с помощью команды **Analys / Setup**. Отменяем режим **AC Sweep** и устанавливаем режим **Transient** - расчет переходных процессов. В диалоговом окне (рис. 2.16) устанавливаем: шаг вывода данных (**Print Step** = 20ns), конечное время анализа (**Final Time** = 5ms), для

отражения установившегося режима запретить вывод результатов анализа в начале переходного процесса (*No-Print delay = 2ms*), максимальный шаг интегрирования (*Step Ceiling = 1us*). На панели *Fourier Analys* устанавливаем основную частоту (*Center Frecuenc = 1k*), число гармоник (*Number of harmonics = 3*) и имя выходной переменной (*Output Vars – V(1)*).

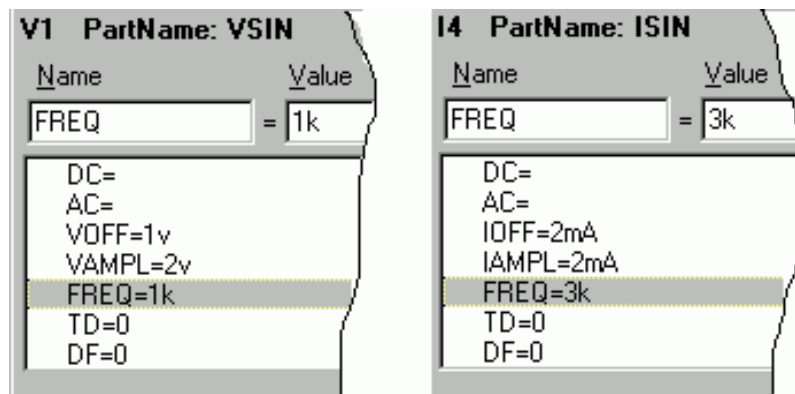


Рис. 2.15

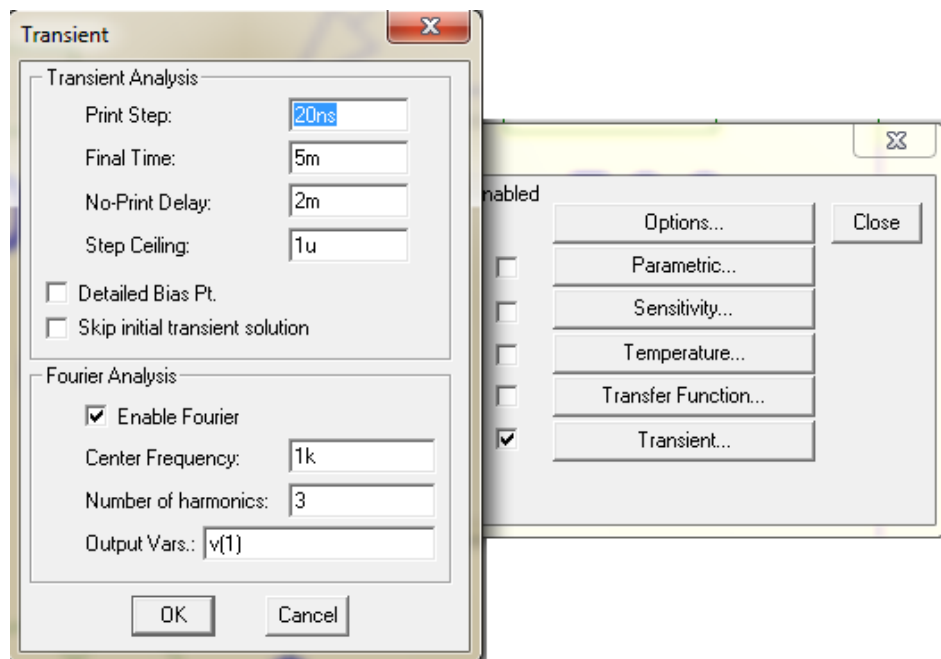



Рис. 2.16

6. Так как в данном случае нас интересует временная зависимость, то включаем графический постпроцессор *Probe* с помощью команды *Analysis / Probe Setup...*, установив режим *Automatically run Probe after simulation*.

После запуска программы *Pspice* и ее завершения, на экране дисплея появится график зависимости потенциала точки 1 от времени (рис. 2.17).

Координаты точек на графике считываются с помощью двух электронных курсоров для левой (A1) и правой (A2) кнопок мыши, которые устанавливаются по команде **Tools/Cursor/Display** или нажатием на пиктограмму . При этом возникает окно **Probe Cursor**, в котором отражены текущие координаты курсоров и расстояние между ними по двум осям координат. Используя курсоры, можно определить период выходного напряжения на конденсаторе.

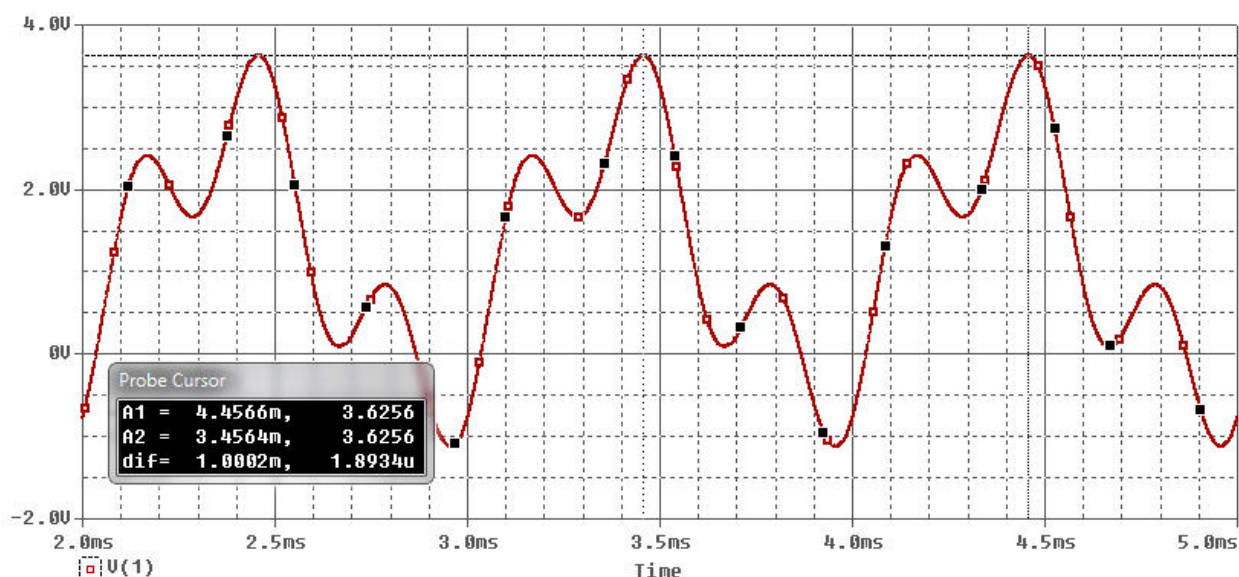


Рис. 2.17

В выходном файле (команда **Analysis/Examine Output**) находим результаты Фурье-анализа (рис. 2.18).

| FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(1) | | | | | |
|---|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| DC COMPONENT = 1.250001E+00 | | | | | |
| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
| 1 | 1.000E+03 | 1.613E+00 | 1.000E+00 | -4.793E+01 | 0.000E+00 |
| 2 | 2.000E+03 | 5.870E-06 | 3.638E-06 | 3.462E+01 | 8.255E+01 |
| 3 | 3.000E+03 | 9.658E-01 | 5.986E-01 | -5.856E+01 | -1.062E+01 |

Рис. 2.18

Пользуясь этой таблицей можно записать выражение для зависимости напряжения $u_C(t)$ как сумму постоянной составляющей, первой и третьей гармоник:

$$u_C(t) = 1,25 + 1,613 \sin(\omega t - 47,93^\circ) + 0,966 \sin(3\omega t - 58,49^\circ) \text{ В},$$

что совпадает с ранее полученным результатом.

3. Анализ переходного процесса в линейной электрической цепи второго порядка

Задача 3. Исследовать переходный процесс для напряжения $u(t)$ в электрической цепи, схема которой приведена на рис. 3.1.

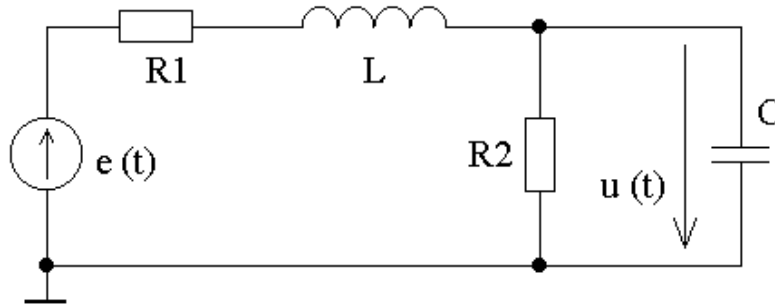


Рис. 3.1

Параметры элементов схемы:

$$L=16\text{мГн}, \quad C=6,8\text{нФ}, \quad R_1=18\text{ Ом}, \quad R_2=6\text{ кОм}.$$

Источник $e(t)$ вырабатывает прямоугольные импульсы с амплитудой 1В. Длительность импульса T_u и паузы T_n одинаковы и равны $T_u = T_n = 400\text{ мкс}$.

Задачу сначала решим вручную, а затем проконтролируем решение с помощью программы моделирования.

Классический метод расчета

Чтобы найти $u_C(t)$, запишем компонентные уравнения и законы Кирхгофа для данной схемы.

$$i_L(t) = i_2(t) + i_C(t) = \frac{u_C(t)}{R_2} + C \frac{du_C(t)}{dt};$$

$$e(t) = E = u_{R1}(t) + u_L(t) + u_C(t) = R_1 i_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + u_C(t).$$

В результате получим дифференциальное уравнение второго порядка.

$$\frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + \left(R_1 C + \frac{L}{R_2} \right) \frac{du_C(t)}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{R_2 L C} u_C(t) = \frac{1}{L C} E.$$

Введем новые обозначения и получим

$$\frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + a_1 \frac{du_C(t)}{dt} + a_0 u_C(t) = b_0.$$

Рассмотрим схему в момент подачи импульса.

До подачи импульса $e(t) = 0$. Поэтому в соответствии с законами коммутации:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = u_C(0) = 0,$$

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) = i_1(0) = 0,$$

где $u_C(0) = 0$ и $i_L(0) = 0$ – независимые начальные условия (ННУ).

Решение для $u_C(t)$ после подачи импульса будем искать в виде:

$$u_C(t) = u_{C \text{ уст}}(t) + u_{C \text{ св}}(t).$$

В установившемся режиме, то есть при $t \rightarrow \infty$

$$i_{1 \text{ уст}} = i_{L \text{ уст}} = \frac{E}{R_1 + R_2} = 166 \text{ мкА},$$

$$u_{C \text{ уст}} = i_{L \text{ уст}} R_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,997 \text{ В}.$$

Для определения $u_C(t)$ для **свободного режима** составим **характеристическое уравнение**.

$$Z(p) = \frac{(pL + R_1)R_2}{pL + R_1 + R_2} + \frac{1}{pC} = 0.$$

Преобразуя это уравнение, получим

$$p^2 + p \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \right) + \frac{R_1 + R_2}{LCR_2} = 0.$$

$$\text{Или } p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2 = p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

$$\text{Здесь } a_1 = \frac{\omega_0}{Q} = \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \right) = 25,63 \frac{1}{\text{мс}},$$

$$a_0 = \omega_0^2 = \frac{R_1 + R_2}{LCR_2} = 9219 \frac{1}{\text{мс}^2}.$$

Корни характеристического уравнения равны

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 - a_0} = -12,82 \pm \sqrt{163,84 - 9219} = (-12,8 \pm j95,16) \frac{1}{\text{мс}}.$$

Представив решение характеристического уравнения как

$$-\alpha \pm j\omega_{\text{св}} = (-12,8 \pm j95,16) \frac{1}{\text{мс}}, \quad \text{получим, что коэффициент затухания}$$

$$\alpha = 12,82 \frac{1}{\text{мс}}, \text{ а частота свободных колебаний } \omega_{\text{св}} = 95,16 \frac{\text{рад}}{\text{мс}}.$$

Тогда решение для схемы второго порядка и комплексно - сопряженных корней:

$$u_{\text{C}}(t) = u_{\text{C уст}}(t) + u_{\text{C св}}(t) = u_{\text{C уст}}(t) + Ke^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi).$$

Для определение постоянных интегрирования свободной составляющей напряжения K и φ запишем:

$$\begin{cases} u_{\text{C}}(t) = u_{\text{C уст}}(t) + Ke^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi), \\ \frac{du_{\text{C}}(t)}{dt} = -\alpha Ke^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi) + \omega_{\text{св}} Ke^{-\alpha t} \cos(\omega_{\text{св}} t + \varphi. \end{cases}$$

Для момента $t = 0$ данная система перепишется так:

$$\begin{cases} u_{\text{C}}(0) = u_{\text{C уст}} + K \sin \varphi, \\ \frac{du_{\text{C}}(0)}{dt} = -\alpha K \sin \varphi + \omega_{\text{св}} K \cos \varphi. \end{cases}$$

Для решения системы необходимо знать $u_{\text{C}}(0)$ – независимые начальные

условия (ННУ) и $\frac{du_{\text{C}}(0)}{dt}$ – зависимые начальные условия (ЗНУ). ННУ были

найжены ранее: $u_{\text{C}}(0) = 0$, а ЗНУ можно найти из соотношения $i_{\text{C}}(t) = C \frac{du_{\text{C}}(t)}{dt}$.

Откуда $\frac{du_{\text{C}}(0)}{dt} = \frac{i_{\text{C}}(0)}{C}$. Ток $i_{\text{C}}(0)$ определяем из схемы для начальных

состояний (рис. 3.2) по принципу суперпозиции $i_{\text{C}}(0) = i_{\text{L}}(0) - \frac{u_{\text{C}}(0)}{R_2} = 0$.

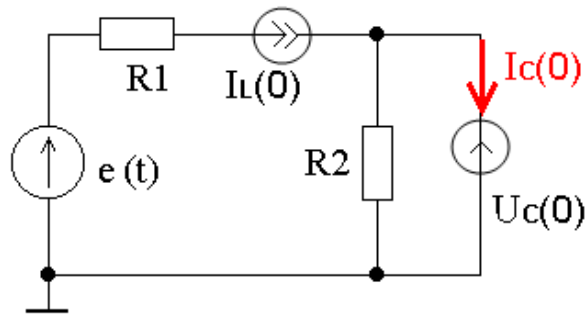


Рис. 3.2

В результате решения системы

$$u_C(0) = u_{C \text{ уст}} + K \sin \varphi = 0,$$

$$\frac{du_C(0)}{dt} = -\alpha K \sin \varphi + \omega_{\text{св}} K \cos \varphi = 0$$

получаем: $\varphi = \arctg \frac{\omega_{\text{св}}}{\alpha} = 82,32^\circ, \quad K = -\frac{U_{C \text{ уст}}}{\sin \varphi} = -1.$

Таким образом, уравнение для напряжения $u_C(t)$ во время действия импульса имеет вид:

$$u_C(t) = 0,997 - e^{-12820t} \sin(95160t + 82,32^\circ)$$

Рассмотрим схему после окончания импульса (во время паузы).

Для упрощения расчета примем время начала паузы за $t = 0$.

Определим ННУ. К концу действия импульса конденсатор зарядится до напряжения

$$u_C(t_{\text{и}}) = 0,997 - e^{-12820t_{\text{и}}} \sin(95160 t_{\text{и}} + 82,32^\circ \frac{2\pi}{360^\circ}) = 0,992 \text{ В}.$$

Ток в катушке индуктивности к моменту $t = t_{\text{и}}$ равен $i_L(t_{\text{и}}) = i_C(t_{\text{и}}) + i_{R_2}(t_{\text{и}}) = 164 \text{ мкА}.$

Тогда ННУ для следующего интервала (паузы): $u_C(0) = 0,992 \text{ В},$
 $i_L(0) = 164 \text{ мкА}.$

После окончания импульса напряжение на конденсаторе меняется по закону

$$u_C(t) = u_{C_{уст}}(t) + u_{C_{св}}(t)$$

Для паузы $u_{вх} = 0$, поэтому $u_{C_{уст}}(t) = 0$. Корни характеристического уравнения прежние, так как топология схемы не изменилась. Поэтому закон изменения напряжения на конденсаторе запишется следующим образом:

$$u_C(t) = K_{\pi} e^{-12820t} \sin(95160t + \varphi_{\pi})$$

Для определения постоянных интегрирования свободной составляющей напряжения K_{π} и φ_{π} запишем:

$$u_C(0) = K_{\pi} \sin \varphi_{\pi},$$

$$\frac{du_C(0)}{dt} = -\alpha K_{\pi} \sin \varphi_{\pi} + \omega_{св} K_{\pi} \cos \varphi_{\pi}.$$

Для определения постоянных K_{π} и φ_{π} необходимо знать $u_C(0)$ и $\frac{du_C(0)}{dt}$.

Выше было найдено: $u_C(0) = 0,992 \text{ В}$.

Так как $i_C(0) = i_L(0) - \frac{u_C(0)}{R_2} = 0,164 - \frac{0,992}{6} = -0,001 \text{ мА} \approx 0$, то и

$\frac{du_C(0)}{dt} = 0$. Тогда система уравнений преобразуется к виду:

$$K_{\pi} \sin \varphi_{\pi} = 0,992,$$

$$-12820 \sin \varphi_{\pi} + 95160 \cos \varphi_{\pi} = 0.$$

Решение системы даст следующий результат: $\varphi = 82,32^\circ$,

$$K = \frac{0,992}{\sin 82,32^\circ} = 1.$$

И в результате получим $u_C(t) = e^{-12820t} \sin(95160t + 82,32^\circ)$.

Моделирование схемы

Моделирование любой электрической цепи в системе *Design Lab* начинается с вычерчивания принципиальной схемы с помощью графического редактора *SCHEMATICS* (рис. 3.3).

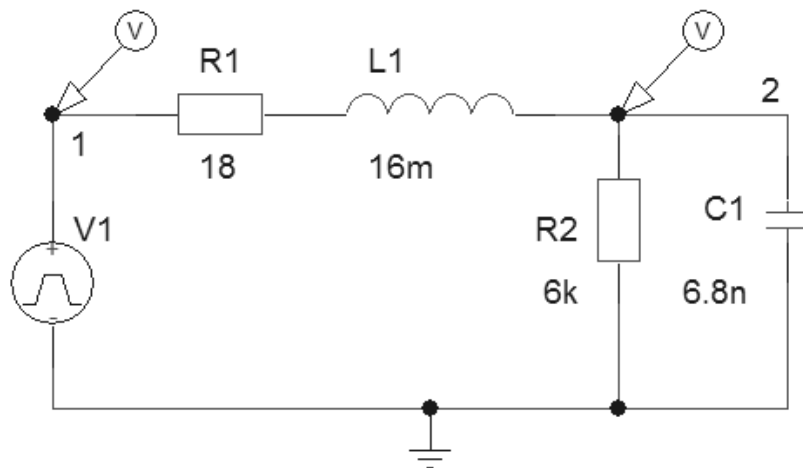


Рис. 3.3

Особенностью данной схемы является включение импульсного источника напряжения *VPULSE*, имеющего следующие значения атрибутов: начальное значение сигнала импульса $V1 = 0$, уровень напряжения при наличии импульса $V2 = 1$, задержка импульса относительно начала отсчета времени $TD = 0\mu$, длительность переднего фронта импульса $TR = 1ns$, длительность заднего фронта импульса $TF = 1ns$, длительность импульса $PW = 400\mu$, период повторения импульса $PER = 800\mu$.

Параметры моделирования переходного процесса начинаем с параметра *Final Time* (конечное время расчета), который разумно выбрать больше периода входного воздействия. Устанавливаем *Final Time* – 1000μ , а *Step Ceiling* = 1μ .

После того, как программа проведет расчет схемы (*F11*), получим осциллограммы переходных процессов (рис. 3.4) на генераторе (точка 1) и конденсаторе (точка 2).

Для определения периода свободных колебаний нужно измерить время между двумя максимумами напряжения. В рассматриваемой задаче координаты максимумов получились следующими (см. рис. 3.4):

$$t_1 = 33,411 \text{ мкс}; \quad u(t_1) = 1,6500 \text{ В.}$$

$$t_2 = 99,413 \text{ мкс}; \quad u(t_2) = 1,2776 \text{ В.}$$

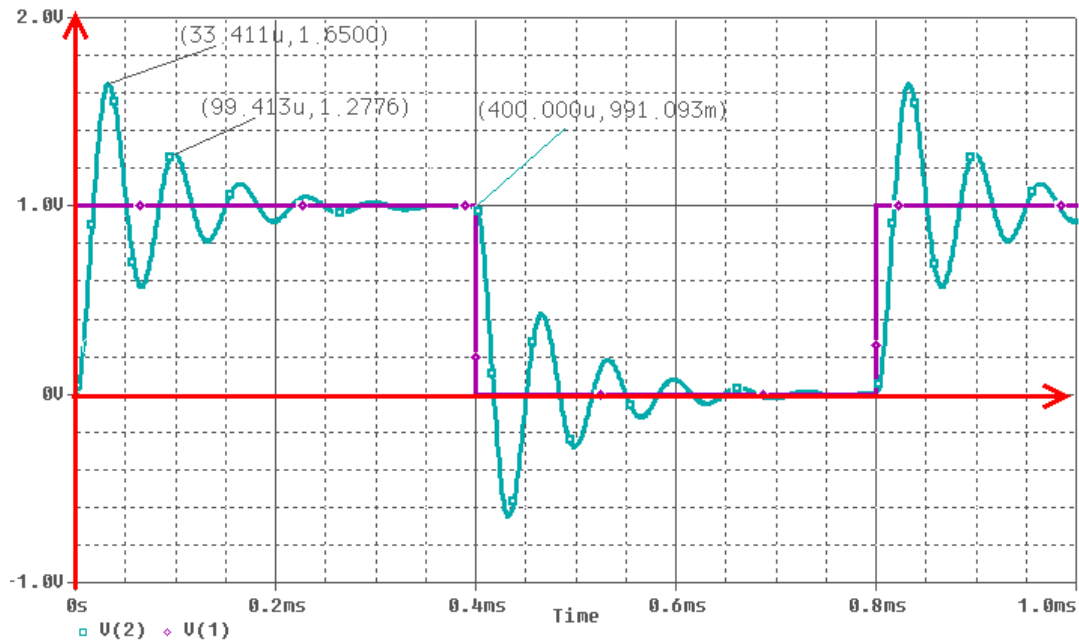


Рис. 3.4

Поскольку $t_2 - t_1 = T_{\text{св}}$, то $T_{\text{св}} = 66,004 \text{ мкс}$. Эти же измерения позволяют определить и коэффициент затухания α , и частоту свободных колебаний $f_{\text{св}}$, и круговую частоту свободных колебаний $\omega_{\text{св}}$.

$$\alpha = \frac{\ln \frac{u_{\text{max}1}}{u_{\text{max}2}}}{t_2 - t_1} = \frac{\ln \frac{1,65 - 1}{1,2776 - 1}}{66,004} = 0,0129 \text{ мкс}^{-1} = 12900 \text{ с}^{-1},$$

$$f_{\text{св}} = \frac{1}{T_{\text{св}}} = 15,625 \text{ кГц},$$

$$\omega_{\text{св}} = 2\pi f_{\text{св}} = 95,194 \cdot 10^3 \text{ рад/с.}$$

По осциллограмме (рис. 3.4) можно определить значение $u(T_{\text{и}})$, которое равно 991 мВ и с достаточной точностью соответствует расчетному значению 992 мВ.

4. Анализ частотных характеристик активных RC- цепей

Активными RC-цепями (ARC-цепями) называются электрические цепи, содержащие резисторы, конденсаторы и операционные усилители (ОУ).

Задача 4. Для ARC-цепи, представленной на рис. 4.1:

- составить уравнения по методу узловых потенциалов и получить передаточную функцию. Эту функцию представить в виде:

$$H(p) = \frac{\dot{U}}{\dot{E}} = \frac{p^2 B_2 + p B_1 + B_0}{p^2 + p A_1 + A_0} = \frac{p^2 B_2 + p B_1 + B_0}{p^2 + p \omega_0 / Q + \omega_0^2}. \quad (4.1)$$

- получить выражения для всех коэффициентов A_i и B_i передаточной функции $H(p)$. По этим коэффициентам рассчитать квазирезонансную частоту f_0 и добротность Q . Найти коэффициент передачи на частоте f_0 .
- провести качественное сравнение со схемой в отсутствии операционного усилителя.
- смоделировать исследуемую ARC-цепь в системе **DesignLab**, получить и проанализировать ее амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики.

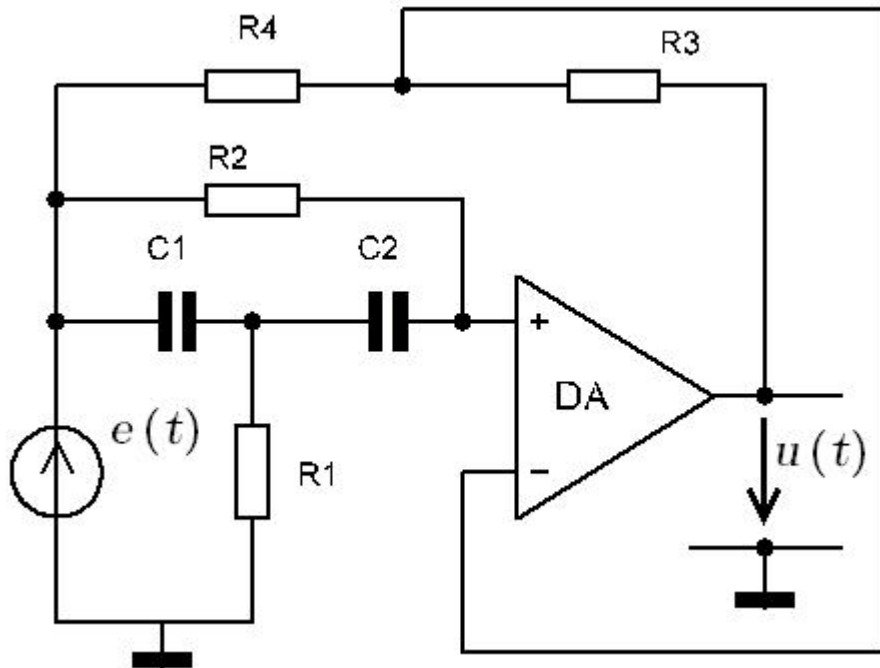


Рис. 4.1

Параметры схемы: $C_1 = C_2 = 0,5$ нФ, $R_1 = 2$ кОм, $R_2 = 4$ кОм, $R_3 = R_4 = 1$ кОм.

Операционный усилитель (ОУ) при расчете передаточной функции и при моделировании считать идеальным, т.е. в схеме замещения он должен быть представлен источником напряжения, управляемым напряжением (ИНУН).

Получение передаточной функции.

Для записи уравнений по методу узловых потенциалов рисуем эквивалентную схему замещения (рис. 4.2).

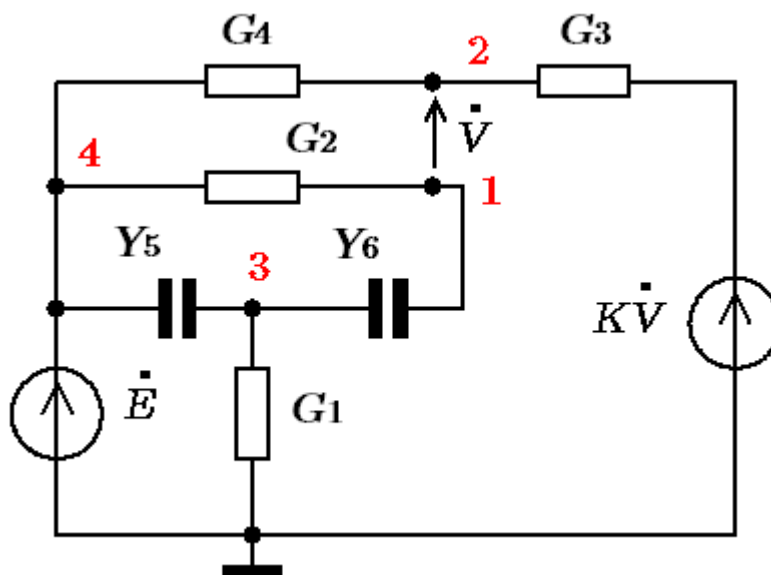


Рис. 4.2

Вводим обозначения:

$$G_1 = 1/R_1, \quad G_2 = 1/R_2, \quad G_3 = 1/R_3, \quad G_4 = 1/R_4, \quad Y_5 = pC_1, \quad Y_6 = pC_2.$$

Нумеруем узлы: 0, 1, 2, 3 и 4. Потенциал нижней точки принимаем равным нулю ($\dot{\phi}_0 = 0$). Потенциал $\dot{\phi}_4 = \dot{E}$. Запишем три уравнения:

$$\begin{aligned}(G_2 + Y_6)\dot{\phi}_1 - Y_6\dot{\phi}_3 - G_2\dot{\phi}_4 &= 0, \\ -Y_6\dot{\phi}_1 + (G_1 + Y_5 + Y_6)\dot{\phi}_3 - Y_5\dot{\phi}_4 &= 0, \\ (G_3 + G_4)\dot{\phi}_2 - G_4\dot{\phi}_4 &= G_3K\dot{V}.\end{aligned}$$

Здесь K – внутренний коэффициент усиления операционного усилителя,

$$\dot{V} = \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 - \text{управляющее напряжение.}$$

Перепишем эти уравнения, оставляя только неизвестные потенциалы в левой части уравнений.

$$\begin{aligned}(G_2 + Y_6)\dot{\phi}_1 - Y_6\dot{\phi}_3 &= G_2\dot{E}, \\ -Y_6\dot{\phi}_1 + (G_1 + Y_5 + Y_6)\dot{\phi}_3 &= Y_5\dot{E}, \\ -G_3K\dot{\phi}_1 + (G_3K + G_3 + G_4)\dot{\phi}_2 &= G_4\dot{E}.\end{aligned}$$

Решая эту систему трёх уравнений, находим сначала потенциалы $\dot{\phi}_1$ и $\dot{\phi}_2$. Затем находим разность $\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 = \dot{V}$.

Приведём промежуточные выкладки:

$$\begin{aligned}
& (G_1 G_2 G_3 + G_1 G_2 G_4 + G_1 G_3 Y_6 + G_1 G_4 Y_6 + G_2 G_3 Y_5 + G_2 G_3 Y_6 + \\
& + G_2 G_4 Y_5 + G_2 G_4 Y_6 + G_3 Y_5 Y_6 + G_4 Y_5 Y_6) V = \\
& = G_1 G_2 G_3 (-KV + E) + G_1 G_3 Y_6 (-KV) + G_1 G_4 Y_6 (-E) + \\
& + G_2 G_3 Y_5 (-KV + E) + G_2 G_3 Y_6 (-KV + E) + G_3 Y_5 Y_6 (-KV + E).
\end{aligned}$$

Выходное напряжение $\dot{U} = K\dot{V} = K(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)$. Учитывая, что внутренний коэффициент усиления операционного усилителя K стремится к бесконечности, получим:

$$H = \frac{G_1 G_2 G_3 - G_1 G_4 Y_6 + G_2 G_3 Y_5 + G_2 G_3 Y_6 + G_3 Y_5 Y_6}{G_1 G_2 G_3 + G_1 G_3 Y_6 + G_2 G_3 Y_5 + G_2 G_3 Y_6 + G_3 Y_5 Y_6}.$$

Так как $G_3 = G_4 = G$, сокращаем на G и окончательно получаем:

$$H = \frac{G_1 G_2 - G_1 Y_6 + G_2 Y_5 + G_2 Y_6 + Y_5 Y_6}{G_1 G_2 + G_1 Y_6 + G_2 Y_5 + G_2 Y_6 + Y_5 Y_6}.$$

Алгебраические выкладки достаточно трудоёмки. Нам ещё надо привести полученное выражение к виду (4.1). Для этого подставим: $Y_5 = pC_1$ и $Y_6 = pC_2$. И наконец, окончательно, приводя к канонической форме записи, получим выражение (4.1). Его коэффициенты равны:

$$A_0 = B_0 = \omega_0^2 = \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}. \text{ Находим квазирезонансную частоту } f_0 = 112,54 \text{ кГц.}$$

$$A_1 = \frac{\omega_0}{Q} = G_1/C_1 + G_2/C_2 + G_2/C_1. \text{ Находим добротность } Q = 0,3536.$$

$$B_1 = -G_1/C_1 + G_2/C_2 + G_2/C_1 = 0, \quad B_2 = 1.$$

Выражение для построения частотных характеристик получим, заменив $p = j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega B_1}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\omega_0/Q} = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\omega_0/Q} = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (4.2)$$

Выделяем модуль $H(\omega)$ и аргумент $\varphi(\omega)$. Либо сами выделяем, получая аналитические выражения, либо за нас это делает компьютер. Строим АЧХ и ФЧХ.

По числителю (4.2) видно, что при заданных числовых значениях (при $B_1 = 0$) получим частотные характеристики заграждающего фильтра, у которого:

- на частоте равной нулю и частоте равной бесконечности модуль $H = 1$;
- на частоте $\omega = \omega_0$ модуль $H(\omega_0) = 0$.

Если схема не будет содержать операционного усилителя и сопротивлений R_3 и R_4 , то она описывается системой двух узловых уравнений:

$$\begin{aligned}(G_2 + Y_6)\dot{\phi}_1 - Y_6\dot{\phi}_3 &= G_2\dot{E}, \\ -Y_6\dot{\phi}_1 + (G_1 + Y_5 + Y_6)\dot{\phi}_3 &= Y_5\dot{E}.\end{aligned}$$

Передаточная функция $H(p) = (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_0)/\dot{E}$ будет иметь не равный нулю коэффициент B_1 : $B_1 = G_2/C_2 + G_2/C_1$. При $\omega = \omega_0$: $H(\omega_0) = B_1/A_1 = 0.5$. Без операционного усилителя в RC -цепи нельзя получить равный нулю коэффициент передачи на резонансной частоте.

Моделирование схемы

Схема, моделирующая рассматриваемую ARC -цепь, показана на рис. 4.3.

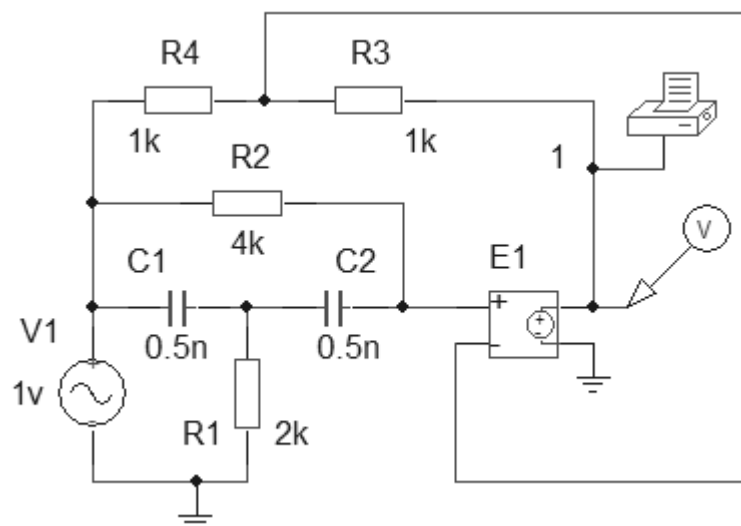


Рис. 4.3

В качестве источника сигнала выбираем источник переменного напряжения VAC , для которого задаём следующие значения параметров (рис. 4.4):

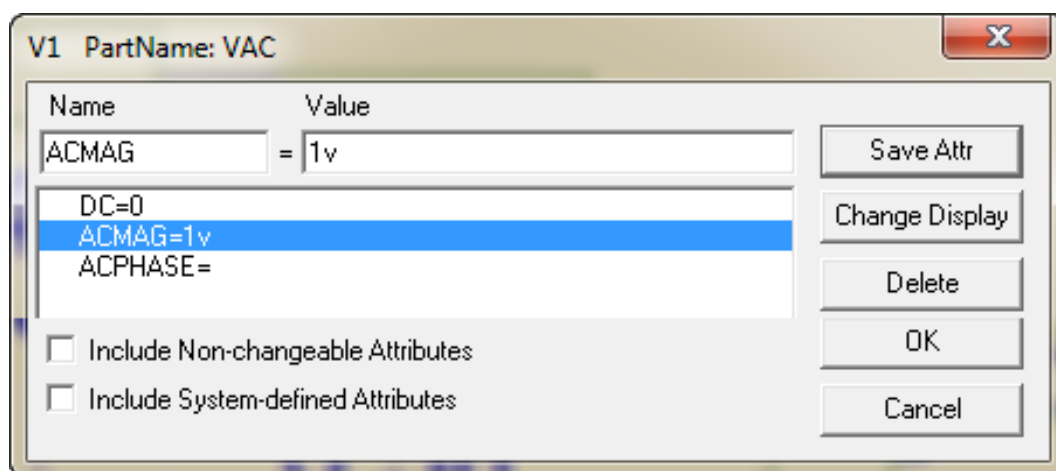


Рис. 4.4

- $DC = 0$ – постоянная составляющая напряжения;
- $ACMAG = 1$ – амплитуда гармонических составляющих напряжения.
- Поле $ACPHASE$ можно оставить пустым, что соответствует нулевой фазе синусоидального напряжения.

Для моделирования идеального операционного усилителя из библиотеки моделей выбираем управляемый источник ИНУН, который в этой библиотеке обозначен буквой **E**. Его условное обозначение (E1) можно увидеть на рис. 4.3. Входы с символами “+” и “-” соответствуют неинвертирующему и инвертирующему входам идеального ОУ. Выход ИНУН, отмеченный символом “-” должен быть соединен с аналоговой землёй, а выход, отмеченный символом “+”, соответствует выходу ОУ. Для этого источника задаем (рис.4.5) коэффициент усиления $GAIN = 10Meg$ или $GAIN = 10000000$ (что практически соответствует идеальному ОУ).

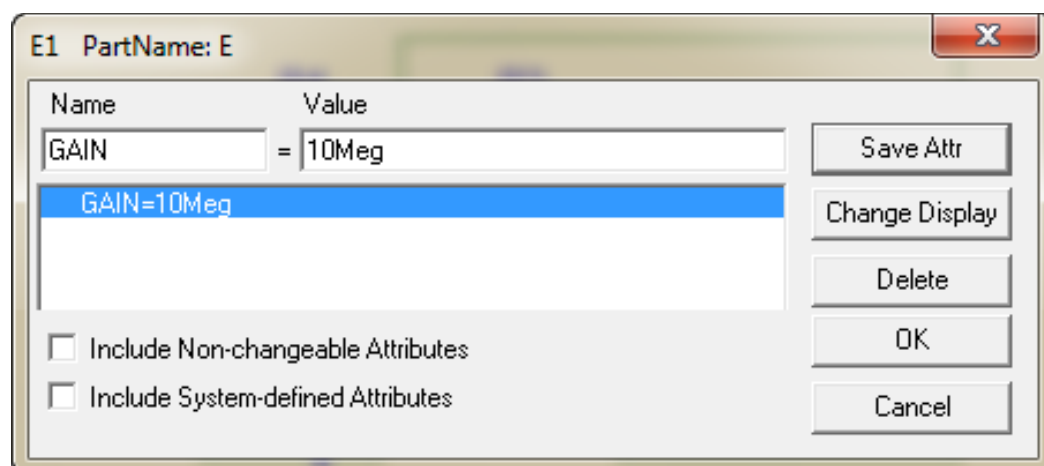


Рис. 4.5

Провод, подключенный к выходу схемы, маркируем, например, цифрой 1 (см. рис. 4.3). Для отражения результата моделирования в виде графика к выходу схемы подключаем маркер *V*.

Если необходимо получить результаты в табличном виде, то к выходу ИНУН подключаем устройство *VPRINT1* и для него устанавливаем: *AC =Yes*, *MAG =Yes* и *PHASE =Yes* (рис. 4.6). Это означает, что в частотном анализе амплитуда и фаза выходного напряжения будут выведены в виде таблицы в выходном файле (файл с расширением .out).

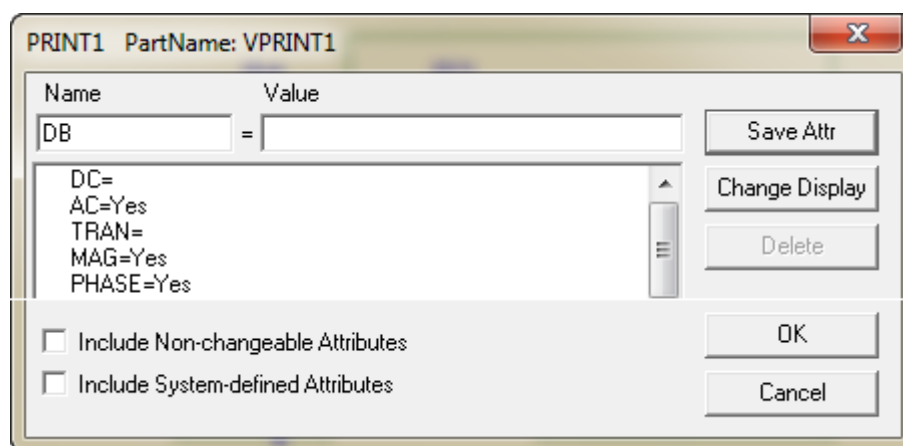


Рис. 4.6

Командой *Analysis / Setup.../ AC Sweep* задаем параметры частотного анализа:

- *AC Sweep Type – Decade* (логарифмическое изменение частоты),
- *Pts/Decade: 1000* (число расчетных точек на декаду),
- *Start Freq.: 1k* (стартовая частота)
- *End Freq.: 10Meg* (конечная частота).

Это будет соответствовать диапазону частот 1кГц – 10 МГц и выводу в выходной файл 1000 точек на декаду АЧХ и ФЧХ (рис.4.7) . Задав эти параметры, закрываем оба открытых окна.

Для получения решения и вывода графиков нажимаем клавишу *F11*. Через несколько секунд на экран выводится АЧХ. Для вывода ФЧХ нужно сделать следующее. Щелкнуть левой кнопкой мыши по позиции *Plot* горизонтального меню. В появившемся вертикальном меню выделить строку *Add Y Axis*, щелкнув по ней левой кнопкой мыши. После чего на экране появляется вторая вертикальная ось.

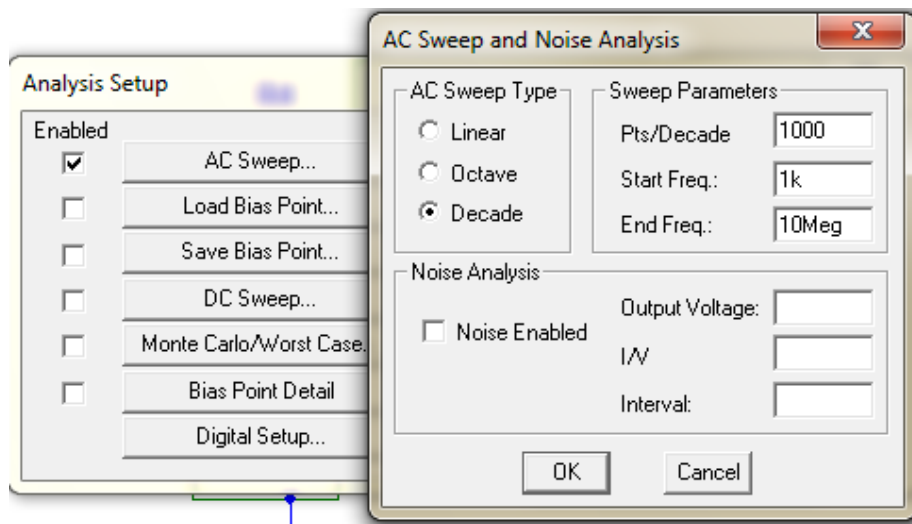


Рис. 4.7

Щелкаем левой кнопкой мыши в позиции горизонтального меню **Trace** и выбираем в появившемся вертикальном меню строчку **Add** (добавить). В нижней части открывшейся панели в строке **Trace Expression** пишем $P(V(1))$. Это соответствует выводу в виде графика фазы напряжения $V(1)$. После чего на экране появляется график ФЧХ (рис. 4.8).

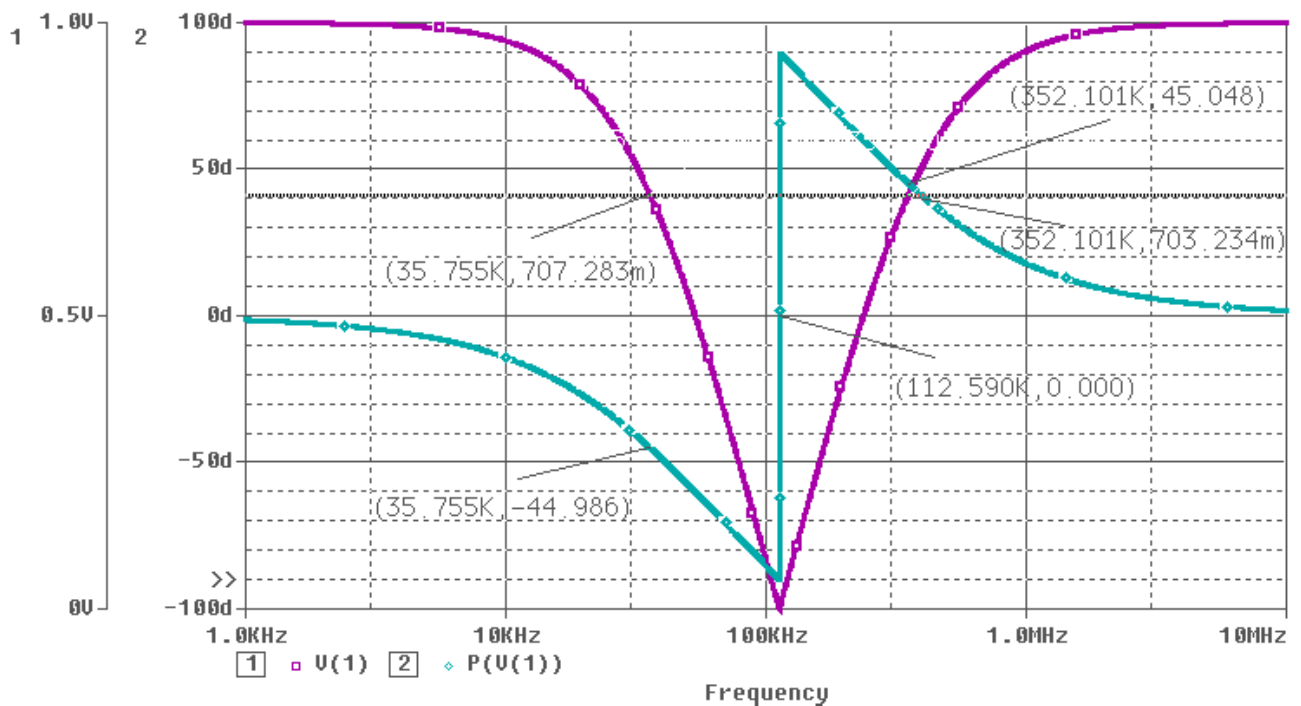


Рис. 4.8. АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы

Характерной особенностью этих графиков является нулевой коэффициент передачи на квазирезонансной частоте f_0 и скачкообразное изменение фазы на этой частоте. Кроме того, из графиков видно, что модуль коэффициента передачи равен единице на частотах $f = 0$ и $f = \infty$. Это позволяет

заклучить, что коэффициент $B_2 = 1$ (это вытекает из уравнения (1) при $\omega = \infty$), а коэффициент $B_0 = A_0 = \omega_0^2$ (при $\omega=0$). С учетом полученных результатов уравнение (1) принимает вид (2).

Анализ знаменателя последнего уравнения показывает, что на двух частотах его действительная часть по абсолютной величине равна его мнимой части. Если обозначить эти частоты как ω_1 и ω_2 и считать, что $\omega_1 < \omega_2$, то их можно определить из уравнений:

$$\omega_0^2 - \omega_1^2 = \omega_1 \frac{\omega_0}{Q} \quad (4.3)$$

$$\omega_0^2 - \omega_2^2 = -\omega_2 \frac{\omega_0}{Q} \quad (4.4)$$


На этих частотах коэффициент передачи равен:

$$H(j\omega_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\pi}{4}};$$

$$H(j\omega_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\pi}{4}}.$$

Из выражений (4.3) и (4.4) находится добротность

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}.$$

Таким образом, для определения коэффициентов $A_0 = \omega_0^2$ и Q уравнения (2) достаточно найти по АЧХ и ФЧХ значения частот f_0 , f_1 и f_2 . Для определения частоты f_1 щелчком левой кнопки мыши по пиктограмме  вызываем электронный курсор. Затем щелкаем левой кнопкой мыши по красному прямоугольнику с надписью $P(V(I))$. Это связывает электронный курсор с графиком ФЧХ. После этого помещаем курсор мыши на график ФЧХ, нажимаем левую кнопку и, не отпуская ее, передвигаем курсор мыши вдоль графика до тех пор, пока значение фазы не станет близким к -45° . (значение фазы отображается в правом нижнем углу экрана). Отпустив левую кнопку мыши и оперируя курсорными клавишами клавиатуры, добиваемся установки электронного курсора на наиболее близкое к значению фазы $\varphi = -45^\circ$. Для выбранных выше установок такими значениями будут: $\varphi_1 = -44,986^\circ$,

$f_1 = 35,755$ кГц. Аналогичным образом находим, что $\varphi_2 = +45,048^\circ$, $f_2 = 352,101$ кГц и $\varphi_0 = 0,000^0$, $f_0 = 112,590$ кГц.

По этим значениям рассчитываем добротность

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{112,590}{352,101 - 35,755} = 0,3559.$$

Теоретическое значение, полученное по заданным параметрам схемы равно 0,3536.

Для получения большей точности нужно изменить данные в задании на анализ. Для этого закрываем окно графиков и окно решения **Pspice AD** и вызываем окно задания на анализ. Для увеличения точности сужаем интервал частот, оставив прежним число точек на этом интервале:

Start Freq.: 10k
End Freq.: 350k.

На выведенных после этого графиках при помощи электронного курсора получим:

$\varphi_0 = 0,000^0$; $f_0 = 112,566$ кГц; $\varphi_1 = -45,00^0$; $f_1 = 35,77$ кГц; $H(f_1) = 0,7071$, что очень близко к теоретическим значениям.

Значения частоты и модуля коэффициента передачи могут быть получены из выходного файла, содержащего таблицу числовых значений для АЧХ и ФЧХ. Для вывода на экран выходного файла нужно закрыть окно графиков и в окне решения (**Pspice AD**) выбрать позицию **Examine Output** в меню **File**. В появившемся окне выходного файла прокручиваем данные до тех пор, пока не появится таблица числовых значений АЧХ и ФЧХ. Из этой таблицы могут быть выписаны интересующие нас данные. При желании выходной файл может быть распечатан на принтере.

Список литературы

1. **Разевиг В. Д.** Применение программ P-CAD и PSPICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 вып. –М.: Радио и связь, 1992.
2. **Разевиг В. Д.** Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). – М.: СК Пресс, 1996.
3. **Разевиг В. Д.** Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V. – М.: "Солон", 1997.
4. **Разевиг В. Д.** Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. – М.: "Солон", 1999.
5. **Кобяк А.Т., Пинаев В.В.** Применение программы анализа электронных схем УПАС /Под ред. А.Н.Старостина – М.: Моск. энерг. ин-т, 1981.
6. **Кобяк А.Т., Новикова Н.Р., Паротькин В.И., Титов А.А.** Применение системы Design Lab 8.0 в курсах ТОЭ и электроники: Метод. пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2001. –128с.
7. **NAGEL, L. W., D. O. PEDERSON.** SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Berkeley, Calif.: University of California, Electronics Research Laboratory. Memorandum ERL-M382, Apr. 12, 1973.
8. **Cadence SPB/OrCAD 16.** <http://www.cadence.com> .

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1. Расчет электрических цепей постоянного тока | 4 |
| 2. Расчет установившихся режимов в линейной электрической цепи при периодическом воздействии | 13 |
| 3. Анализ переходного процесса в линейной электрической цепи второго порядка | 24 |
| 4. Анализ частотных характеристик активных RC - цепей | 30 |
| Список литературы | 40 |

Учебное издание

Кобяк Александр Трофимович
Новикова Наталья Рафаиловна
Титов Александр Анатольевич

**Применение программы схемотехнического
моделирования Design Lab 8.0 для решения задач
по электротехнике**

Методическое пособие по курсу “Электротехника”
для студентов, обучающихся по направлению
Информатика и вычислительная техника

Редактор А.Т.Кобяк
Редактор издательства Н.А. Хрущева

| | |
|--|-----------------------------|
| Темплан издания МЭИ, 2013, метод. | Подписано в печать 03.12.14 |
| Печать офсетная Формат бумаги 60x84/16 | Физ. печ. л. 2,5 |
| Тираж 50 экз. Изд. № 14-020 | Заказ 29 |

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ, 111250, Москва,
ул. Красноказарменная, д.14

Отпечатано в ПЦ МЭИ, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.13

©Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2015

