

УДК 621.03.01(075.8)

Компьютерное схемотехническое моделирование RC и RLC-цепей

Ю.П. Приваленков, А.С. Михайлов

(Костромской государственной технологической академии)

На основе результатов моделирования типовых частотных фильтров в системе DesignLab показана эффективность, результативность и наглядность компьютерного моделирования, как метода анализа переходных и частотных характеристик электронных схем.

Расчет переходных процессов в электрических цепях даже при небольшом количестве входящих в них элементов вызывает у исследователя, с одной стороны, трудности из-за отсутствия достаточной математической подготовки и, с другой стороны, достойное всяческого поощрения желание эффективно использовать свои знания и навыки работы на компьютере. В статье показана практическая возможность и достаточная результативность анализа электрических цепей в системе электронного моделирования DesignLab. Практическая доступность и ценность временного и частотного анализа RC и RLC-цепей с помощью системы DesignLab продемонстрирована на примерах расчета частотных фильтров.

В расчетах переходных процессов радиоэлектронных устройств (РЭУ) ставится целью получения переходных функций и частотных характеристик устройства [1, 2].

Переходные характеристики описывают во времени реакцию схемы на ступенчатое входное воздействие. Экспериментатора интересуют форма кривой переходной характеристики, постоянная времени переходного процесса, перерегулирование, колебательность процесса т.п.

Частотные характеристики позволяют изучить влияние параметров цепи на формирование частотного спектра выходного сигнала. При этом

выявляются такие характеристики как частота среза, полоса пропускания и т.п. Теоретическое описание перечисленных выше понятий доступно во множестве литературных источников, например в [3, 4].

Для расчета переходных процессов применяют классический и операторный методы, метод переменных состояния и т.д. Общий вид переходной характеристики получают классическим или операторным методом.

В первом случае переходные процессы в цепи описываются дифференциальными уравнениями первого или более высокого порядка. Затем аналитически находится решение неоднородного дифференциального уравнения.

Аналитическую форму переходной функции можно получить и операторным методом. В этом методе исходная схема приводится к операторному виду, и далее проводятся достаточно трудоемкие операторные преобразования с последующим переходом во временную область. Эти методы успешно применимы в простых схемах с одним накопителем энергии.

Метод переменных состояния дает частное решение для некоторого набора исходных значений параметров элементов схемы и начальных условий.

Можно утверждать, что аналитические методы трудоемки, имеют малую наглядность в представлении полученных результатов, а также имеют сложности в исследовании частотных характеристик.

Компьютерное моделирование реальных электрических цепей имеет развитое программное обеспечение [5, 6, 7].

Компьютерное исследование переходных процессов в РЭУ позволяет визуализировать аналитические зависимости, что повышает наглядность получаемых результатов и способствует лучшему пониманию свойств изучаемого объекта. Моделирование по информативности подобно натурному эксперименту.

Компьютерное моделирование содержательно состоит из:

- создания компьютерной модели – аналога исходной схемы;
- проверки ее достоверности;
- определения перечня параметров и характеристик, составляющих результат моделирования;
- планирования и управления процессом моделирования и, наконец, обработки результатов моделирования.

Проведем краткий сравнительный анализ наиболее популярных программных пакетов схемотехнического и конструкторского проектирования РЭУ.

В настоящее время имеется достаточно много систем, обеспечивающих комплексное проектирование радиоэлектронной аппаратуры. Такой подход предполагает, что логика, описанная в схеме, воплощается в топологию печатной платы, а программы проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений, автоматически размещают компоненты и трассируют печатную плату, создают документы для автоматизированных производственных систем [5, 8].

Существующие программные средства, предназначенные для проектирования РЭУ, можно разделить на две основные группы: системы схемотехнического проектирования и системы конструкторского проектирования. Это деление является весьма условным, особенно для систем проектирования микроэлектронной аппаратуры, а также СВЧ и излучающих устройств. В последнее десятилетие наметилась явная тенденция интеграции программ в области унификации представления результатов моделирования.

В системах автоматизированного проектирования РЭУ также широко используются различные вспомогательные программные продукты: математические пакеты, базы данных, графические и текстовые редакторы, электронные таблицы.

Одним из наиболее распространенных в России пакетов программ конструкторского проектирования РЭУ является P-CAD фирмы Personal CAD System Inc [8]. Это полноценное комплексное программное решение для проектирования электронных устройств, в частности для ввода схемы и проектирования для нее печатной платы.

Однако, при всем многообразии функций, P-CAD обладает существенными недостатками. Во-первых, для начинающих пользователей P-CAD представляет значительные трудности в освоении. Во-вторых, в самом пакете программ P-CAD отсутствует возможность схемотехнического моделирования проектируемых РЭУ. Эта проблема решена своеобразно, а именно, путем доступности конвертирования форматов и взаимодействия с пакетами третьих фирм. Ну и, наконец, P-CAD является, по сути, системой автоматизированного проектирования печатных плат, то есть больше подходит для промышленных предприятий, являясь чисто конструкторским пакетом.

Широкое распространение получил пакет прикладных программ Electronics Workbench, а именно его до сих пор популярная и самая доступная версия EWB 5.12 [9, 10, 11]. В отличие от других программ схемотехнического моделирования, система Electronics Workbench изображает на экране измерительные приборы с органами управления, максимально приближенные к реальности. Пользователь освобождается от изучения абстрактных правил составления заданий на моделирование. Достаточно поместить на схему двухканальный осциллограф и генератор сигналов – и программа проведет анализ переходных процессов. Если же на схеме разместить анализатор спектра, то будет рассчитан режим по постоянному току, выполнена линеаризация нелинейных компонентов и произведен расчет характеристик схемы в частотной области. Это является существенным достоинством Electronics Workbench.

Однако, вследствие достаточно ограниченных возможностей данного пакета, он может быть полезен для изучения только на этапе начального освоения методов автоматизированного проектирования.

Наибольшее распространение среди разработчиков РЭА получила система **DesignLab** корпорации MicroSim [5]. Она оказалась очень удачной, интенсивно развивается и, де-факто, стала эталонной программой моделирования аналоговых устройств. В системе DesignLab предусмотрены следующие режимы моделирования:

- расчет частотных характеристик;
- расчет режима по постоянному току (включая чувствительность по постоянному току);
- расчет передаточных функций по постоянному току;
- расчет переходных процессов.
- статистический анализ и наихудший случай;
- задание параметров цифровых устройств;
- вариации температуры.

Принятые в системе **DesignLab** математические модели полупроводниковых приборов используются во многих аналогичных программах, а списки соединений в формате **SPICE** поддерживаются большинством систем моделирования РЭУ. Эта система и некоторые совместимые с ней аналоги достаточно известны, используются на предприятиях промышленности и в технических университетах.

Пользовательский диалог продукта достаточно понятен, что следует отнести еще к одному его достоинству. Он реализован программой **Schematics**, входящей в состав системы. Программа поддерживает графический ввод схемы, задание директив моделирования и запуск процесса моделирования. По окончании модельного эксперимента автоматически запускается программа графического анализа полученных характеристик **Probe**.

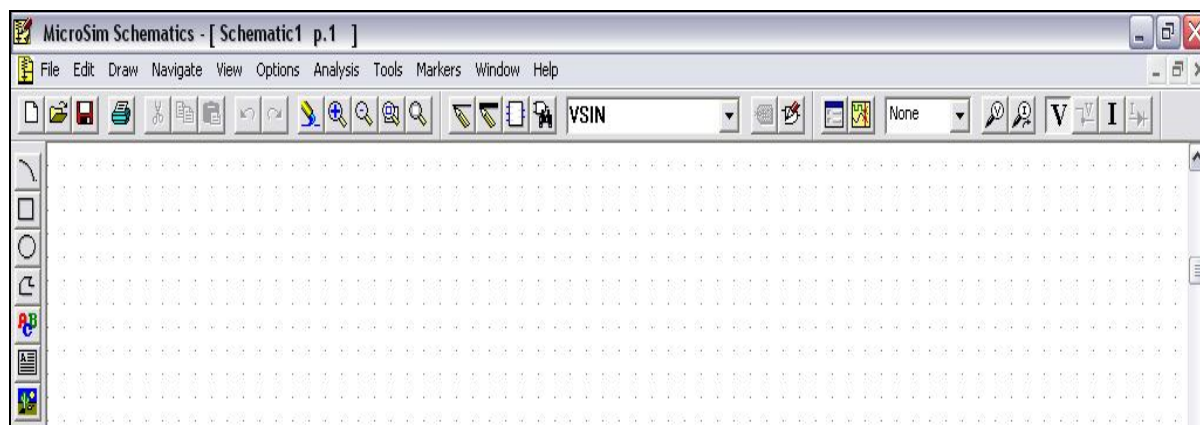


Рис.1. Фрагмент окна программы Schematics.

Редактор *Schematics* (рис. 1) имеет главное меню и панель инструментов с кнопками быстрого запуска, как и большинство Windows-приложений. В верхней части экрана располагается горизонтальное меню, состав которого зависит от выбранного режима редактирования (редактирование принципиальных электрических схем либо редактирование символов, то есть условных графических обозначений компонентов).

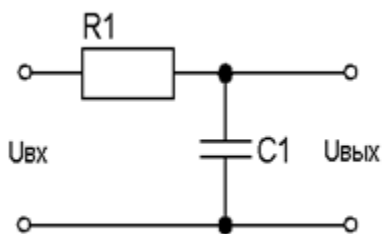


Рис.2 НЧФ первого порядка.

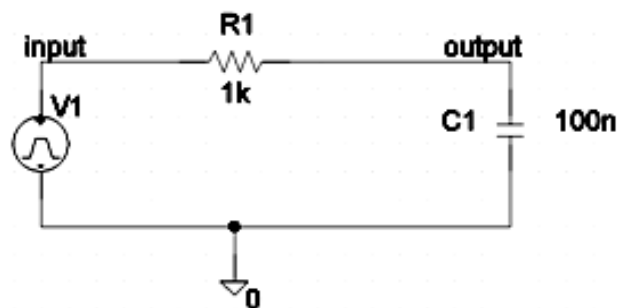


Рис.3. НЧФ в программе Schematics.

Поясним методику компьютерного моделирования в *DesignLab* на примерах определения параметров типовых частотных фильтров первого и второго порядка [5].

Низкочастотный фильтр (НЧФ) первого порядка показан на рис. 2. Для этого фильтра вычислим аналитически передаточную функцию, амплитудночастотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики, ча-

стоту среза, переходную характеристику, постоянную времени и выведем уравнения в функции времени выходных параметров.

Передаточная функция НЧФ определяется следующим выражением:

$$W(j \cdot \omega) = \frac{1/j \cdot \omega \cdot C1}{1/j \cdot \omega \cdot C1 + R1} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot C1 \cdot R1}. \quad \text{В случае, когда } R1 = 1 \text{ кОм и}$$

$$C1 = 100 \text{ нФ передачная функция примет вид} \quad W(j \cdot \omega) = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot 10^{-4}}.$$

АЧХ фильтра является модулем передаточной функции, а ФЧХ – функция от разности фаз входного и выходного напряжения [4].

При угловой частоте $\omega_c = \frac{1}{R1 \cdot C1}$ модуль АЧХ $W(\omega_c) = \frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{ дБ}$. Частота $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$ называется *частотой среза* (критической частотой или частотой излома) АЧХ. На критической частоте фаза выходного сигнала равна -45° . При значениях $R1 = 1 \text{ кОм}$ и $C1 = 100 \text{ нФ}$ критическая частота будет равна $f_c \approx 1592 \text{ Гц}$.

Уравнение переходной характеристики получим из второго закона Кирхгофа, имеющего вид дифференциального уравнения

$$U_{\text{ex}} = i \cdot R1 + \frac{1}{C1} \int i \cdot dt. \quad \text{Общий вид решения для уравнения тока будет}$$


$$i(t) = \frac{U_{\text{ex}}}{R1} \cdot e^{-\frac{t}{R1 \cdot C1}}. \quad \text{Напряжение на емкости равно } U_c(t) = U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{ex}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R1 \cdot C1}}\right).$$

$$\text{Для заданных ранее параметров } U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{ex}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{10^{-4}}}\right).$$



Постоянная времени определяется из выражения $\tau = R1 \cdot C1$ и равна $\tau = 0,1 \text{ мс}$. Как известно, за время τ величина выходного напряжения достигает 63% установившегося значения.

Так как передаточная функция и уравнение переходной характеристики для НЧФ соответствуют апериодическому звену первого порядка

[1], при моделировании следует ожидать апериодического переходного процесса, при котором выходная величина подходит к установившемуся значению без колебаний и без перерегулирования.

Схема фильтра, собранная в программе *Schematics*¹, представлена на рис. 3. Ввод и размещение электрорадиокомпонентов осуществляется нажатием на кнопку «*Get New Part*» на панели инструментов . Пассивные электрорадиокомпоненты находятся в библиотеке *ANALOG.slb*. На вход схемы подключен импульсный источник напряжения *VI*, который находится в библиотеке *SOURCE.slb*. Достоинством этого источника является то, что он может быть использован и при частотном анализе цепей, и как источник входного импульсного сигнала при исследовании переходных процессов.

Для получения АЧХ и ФЧХ данного фильтра разместим на входе и выходе схемы маркеры. Для этого выберем в меню *Markers* пункт *Mark Advanced...*, в появившемся диалоговом окне маркеры *vdb* и *vphase* и разместим их на входе и выходе схемы. Вход и выход схемы на рис. 3 обозначены как *input* и *output*.

После размещения маркеров необходимо определить режим моделирования, нажав на кнопку  на панели инструментов. В появившемся окне необходимо выбрать пункт *AC Sweep*, задать параметры директивы моделирования (характер изменения частоты, диапазон частот для анализа и др.) и затем запустить процесс моделирования, нажав на кнопку  на панели инструментов.

Результаты моделирования АЧХ и ФЧХ показаны на рис.4.

¹ Здесь и далее жирным курсивом выделены надписи и команды используемые в *DesignLab*

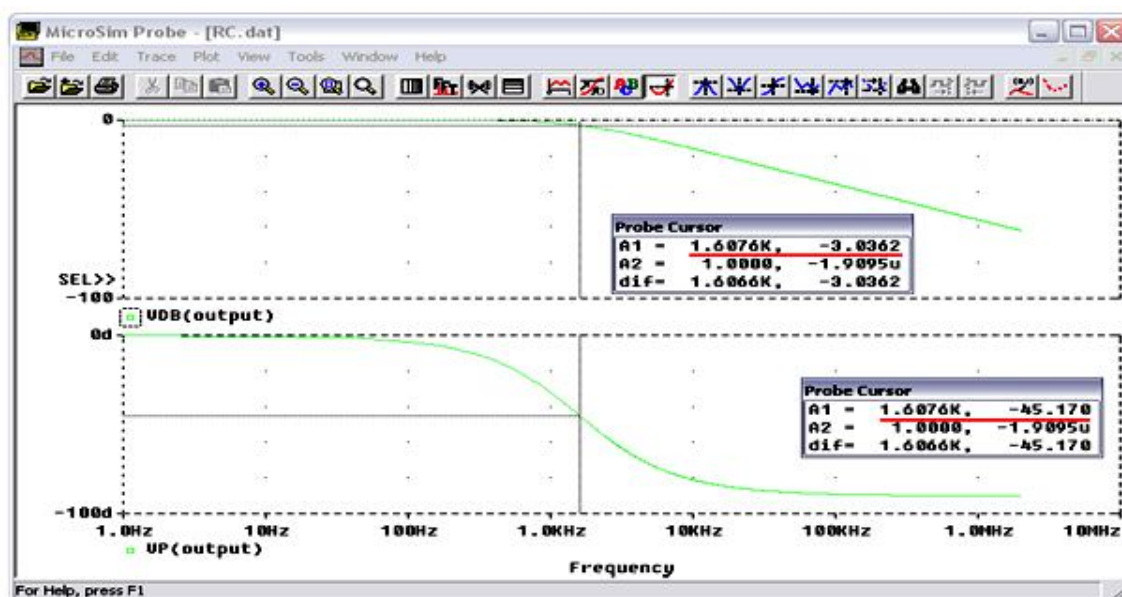




Рис.4. АЧХ и ФЧХ низкочастотного фильтра первого порядка.

Графический анализ полученных характеристик выполняется программой *Probe*. Нажатием на кнопку  («*Toggle Cursor*») включаем режим *Probe Cursor*. Для считывания координат осей перемещаем курсор мыши по графику функции. Значения координат осей отображаются в окне *Probe Cursor*. Видно, что критическая частота $f_c = 1,6 \text{ кГц}$, полученная в ходе эксперимента, совпадает со значением, полученным ранее аналитически.

Проведем временной анализ RC-цепи. Для этого разместим на входе и выходе маркеры напряжения, нажав на кнопку  на панели инструментов, установим режим моделирования *Transient*, зададим параметры директивы моделирования (конечное время анализа, временной шаг расчета характеристик и др.) и запустим процесс моделирования.

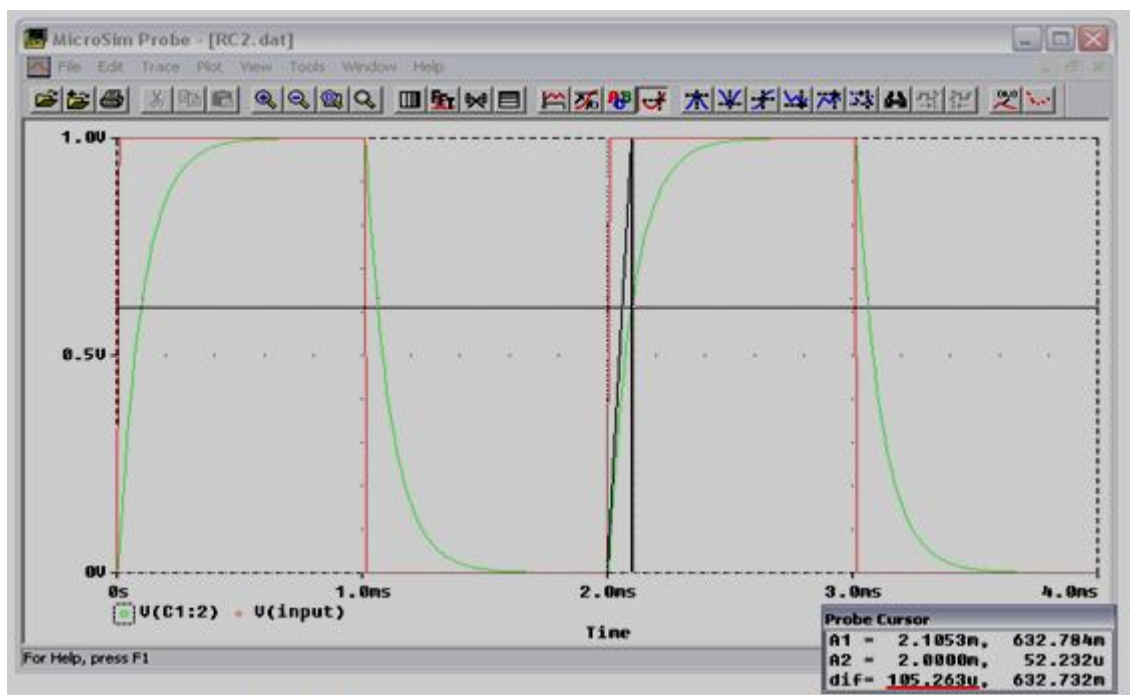


Рис.5. Результаты временного анализа ФНЧ.

По результатам временного анализа, рис. 5, постоянная времени τ (определена графически) составляет $\tau \approx 105,263$ мкс. Погрешность 5,26% к аналитическому значению обусловлена лишь точностью проведения касательной к начальной точке переходной характеристики.

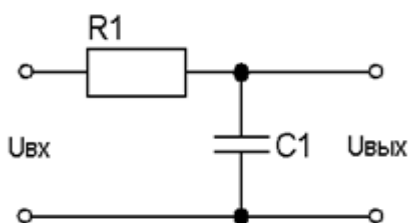


Рис.6. ФВЧ первого порядка.

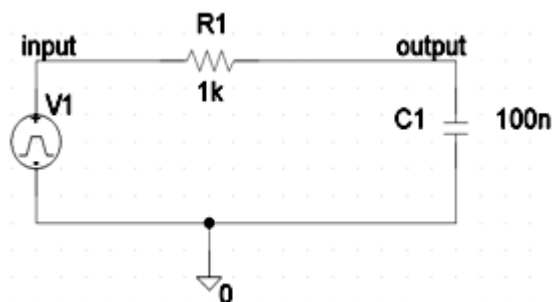


Рис.7. ФВЧ в программе Schematics.

На рис. 6 показан *фильтр верхних частот (ФВЧ) первого порядка*. ФВЧ имеет характеристики дифференцирующего звена [1]. Схема фильтра в *Schematics* приведена на рис.7 ($R1 = 1$ кОм, $C1 = 100$ нФ).

Проведя аналитические вычисления, аналогичные выполненным ранее при анализе НЧФ, получим следующие результаты.

$$\text{Передаточная функция: } W(j \cdot \omega) = \frac{R1 / j \cdot \omega \cdot C1}{\left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C1} \right) + R1} = \frac{j \cdot \omega \cdot C1 \cdot R1}{1 + j \cdot \omega \cdot C1 \cdot R1}. \text{ Для}$$

$$R1 = 1 \text{ кОм и } C1 = 100 \text{ нФ} \quad W(j \cdot \omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot 10^{-4}}{1 + j \cdot \omega \cdot 10^{-4}}.$$

$$\text{Частота среза } f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}, \text{ где } \omega_c = \frac{1}{R1 \cdot C1}.$$

При заданных номиналах элементов фильтра $f_c \approx 1592 \text{ Гц}$.

$$\text{Переходная характеристика ФВЧ: } U_{\text{ex}} = i \cdot R1 + \frac{1}{C1} \int i \cdot dt.$$

$$\text{Уравнение тока } i(t) = \frac{U_{\text{ex}}}{R1} \cdot e^{-\frac{t}{R1 \cdot C1}} \text{ и соответственно } U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{ex}} \cdot e^{-\frac{t}{R1 \cdot C1}}.$$

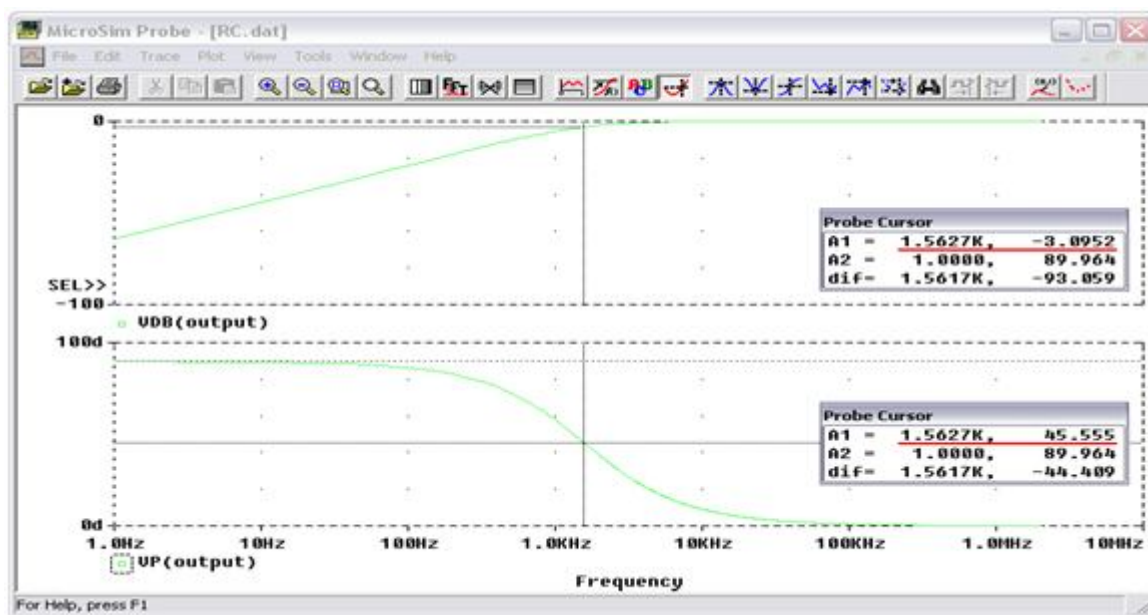


Рис.8. АЧХ и ФЧХ ФВЧ первого порядка.

$$\text{Для заданных значений } R1 = 1 \text{ кОм, } C1 = 100 \text{ нФ} \quad U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{ex}} \cdot e^{-\frac{t}{10^{-4}}}.$$

Постоянная времени $\tau = R1 \cdot C1$ равна $\tau = 0,1 \text{ мс}$.

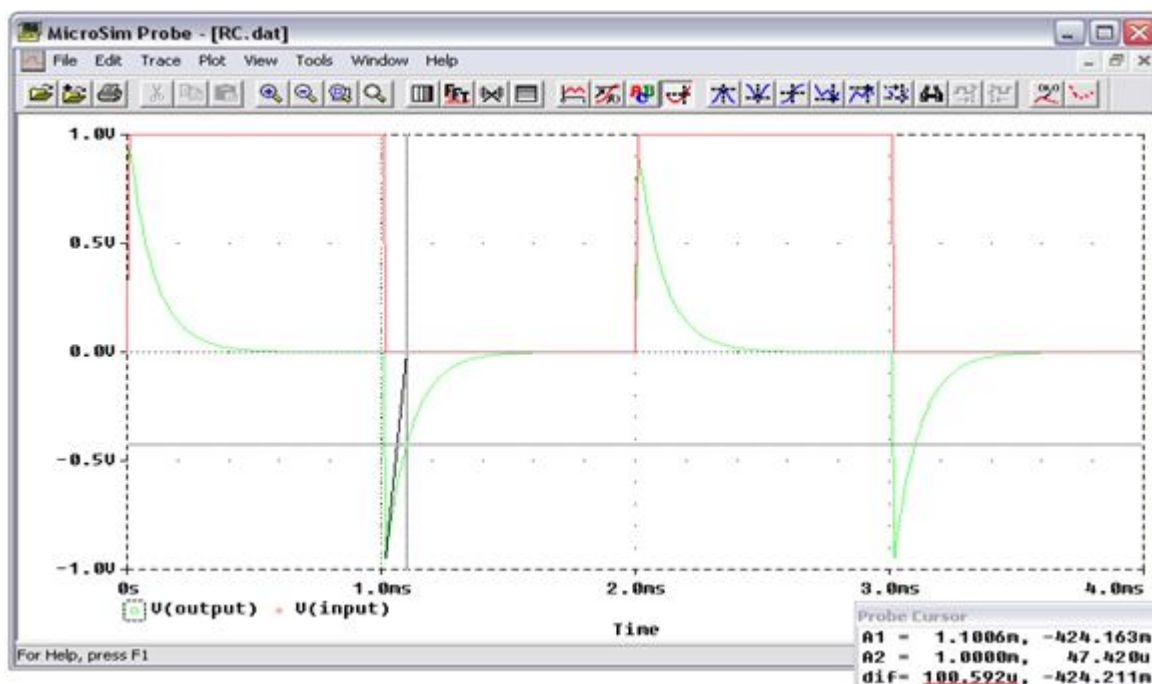


Рис.9. Результаты временного анализа ФВЧ.

Полученные результаты частотного и временного анализа, рис. 8 и рис. 9, близки к аналитически полученным значениям. Частота среза равна $f_c \approx 1562 \text{ Гц}$. Постоянная времени τ определена графическим способом (рис. 9) и составляет $\tau \approx 100,592 \text{ мкс}$ (погрешность в 0,592%).

Таким образом, завершая моделирование НЧФ и ФВЧ, можно убедиться в том, что результаты его совпадают с аналитическими расчетами и представлены в понятной визуальной форме.

На рис. 10 и рис. 11 показан последовательный резонансный контур, работающий как *полосовой* фильтр. Фильтр обеспечивает прохождение сигнала без подавления в определенном частотном диапазоне или полосе пропускания.

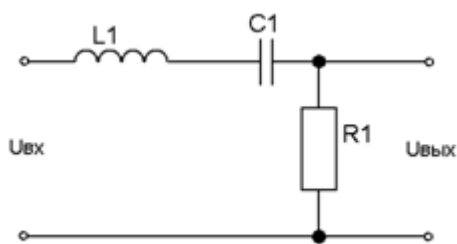


Рис.10. Полосовой фильтр.

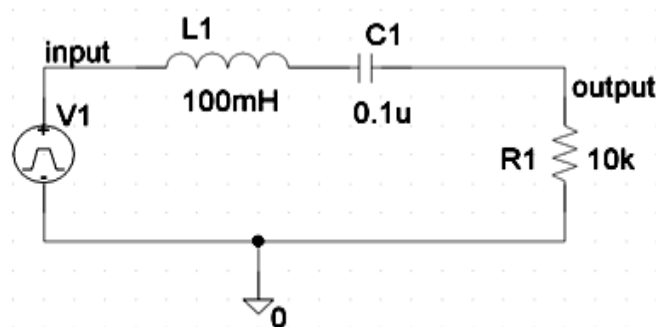


Рис.11. Полосовой фильтр в программе Schematics.

Основные характеристики полосового фильтра: *коэффициент затухания; резонансная частота контура; верхняя и нижняя критические частоты*. Переходная характеристика такой цепи определяется несколько сложнее, чем для НЧФ или ФВЧ. Пример аналитического нахождения переходной характеристики можно найти в [4].

Передаточная функция представленного фильтра соответствует инерционному звену второго порядка [1]:

$$W(j \cdot \omega) = \frac{R1}{R1 + j \cdot \omega \cdot L1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C1}} = \frac{j \cdot \omega \cdot R1 \cdot C1}{j \cdot \omega \cdot R1 \cdot C1 - \omega^2 \cdot L1 \cdot C1 + 1}.$$

При $R1 = 10 \text{ кОм}$, $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$ и $L1 = 100 \text{ мГн}$ передаточная функция будет определена как: $W(j \cdot \omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot 10^{-3}}{j \cdot \omega \cdot 10^{-3} - \omega^2 \cdot 10^{-8} + 1}.$

Коэффициент затухания фильтра имеет вид $D = \frac{R1}{2} \sqrt{\frac{C1}{L1}}$ и при заданных параметрах схемы равен $D = 5$.

Нижняя и верхняя критические частоты соответственно равны: $\omega_H = (\sqrt{D^2 + 1} - D) \cdot \omega_0$ и $\omega_B = (\sqrt{D^2 + 1} + D) \cdot \omega_0$ или $f_H = 157,6 \text{ Гц}$ и $f_B \approx 16 \text{ кГц}$.

Резонансная частота контура определяется выражением $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L1 \cdot C1}}$ и численно равна $f_0 = 1,59 \text{ кГц}$.

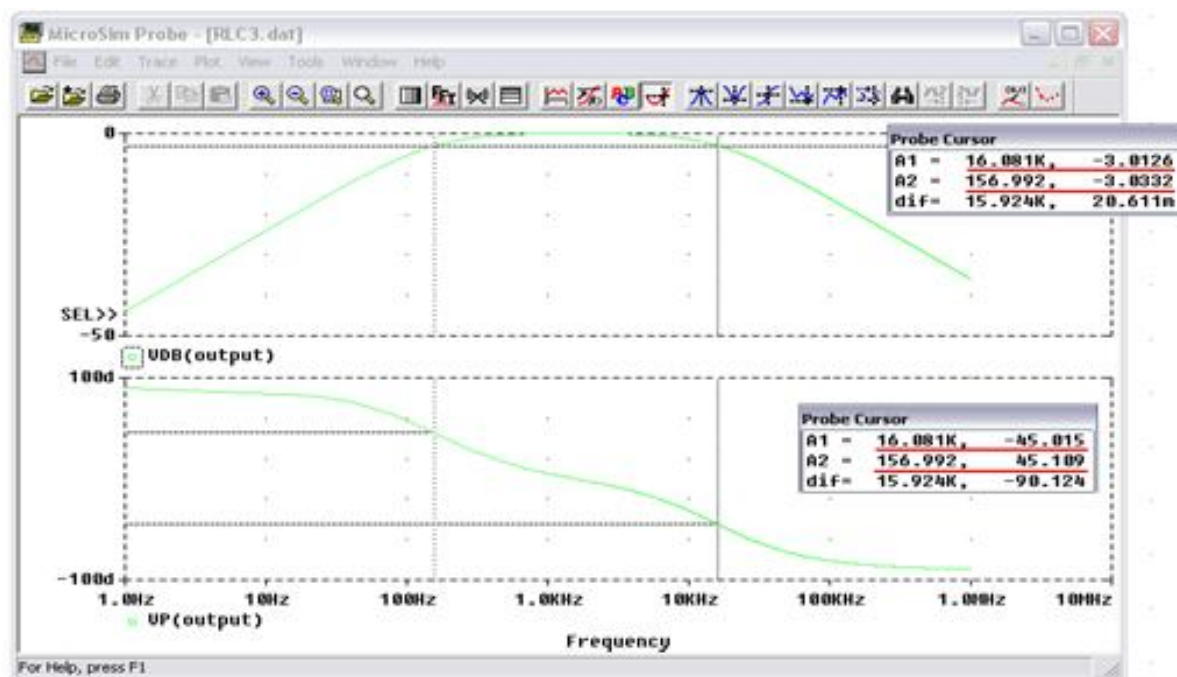


Рис.12. АЧХ и ФЧХ полосового фильтра.

Результаты моделирования частотных характеристик фильтра представлены на рис.12. Очевидно, что полученные значения граничных частот удовлетворительно совпадают с полученными расчетными значениями.

В процессе моделирования полосовых фильтров особый интерес представляет изучение зависимости характера переходных процессов от параметров схемы. Задавая номиналы элементов схемы, можно получить апериодический или колебательный переходный процесс.

При исходном наборе параметров фильтр имеет $D = 5$, его называют передемпфированным. Результаты моделирования переходного процесса представлены на рис. 13. Переходный процесс апериодический, постоянная времени $\tau \approx 1,333 \text{ мс}$.

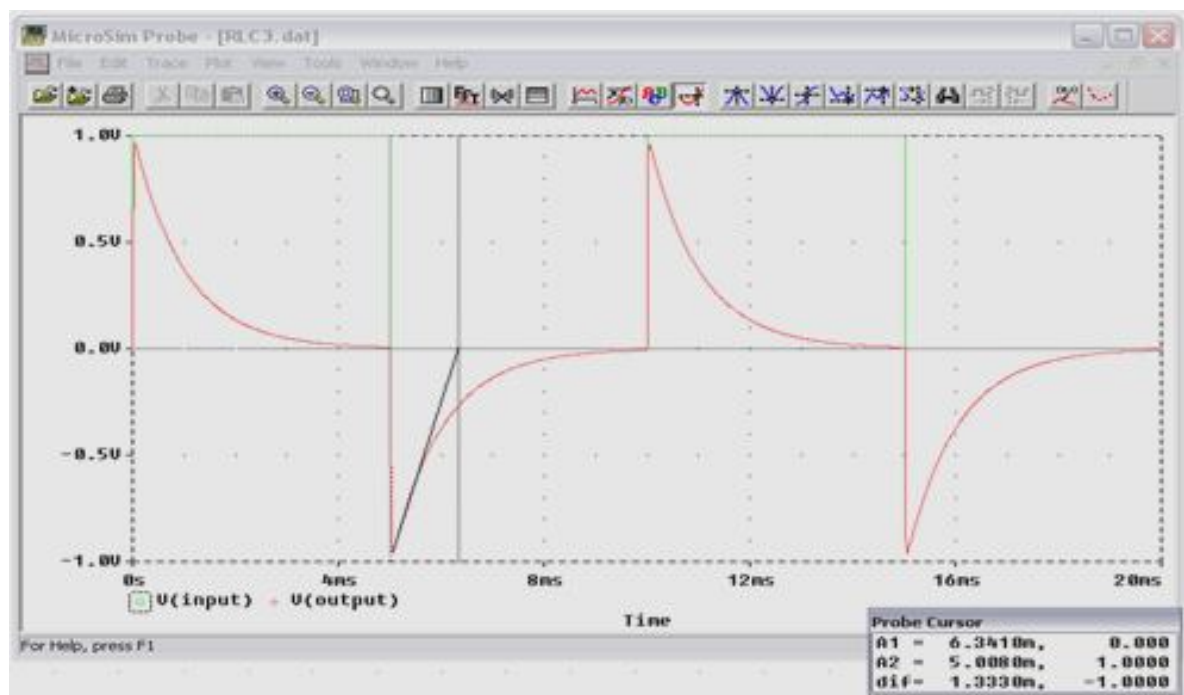


Рис.13. Результаты временного анализа полосового фильтра при $D=5$.

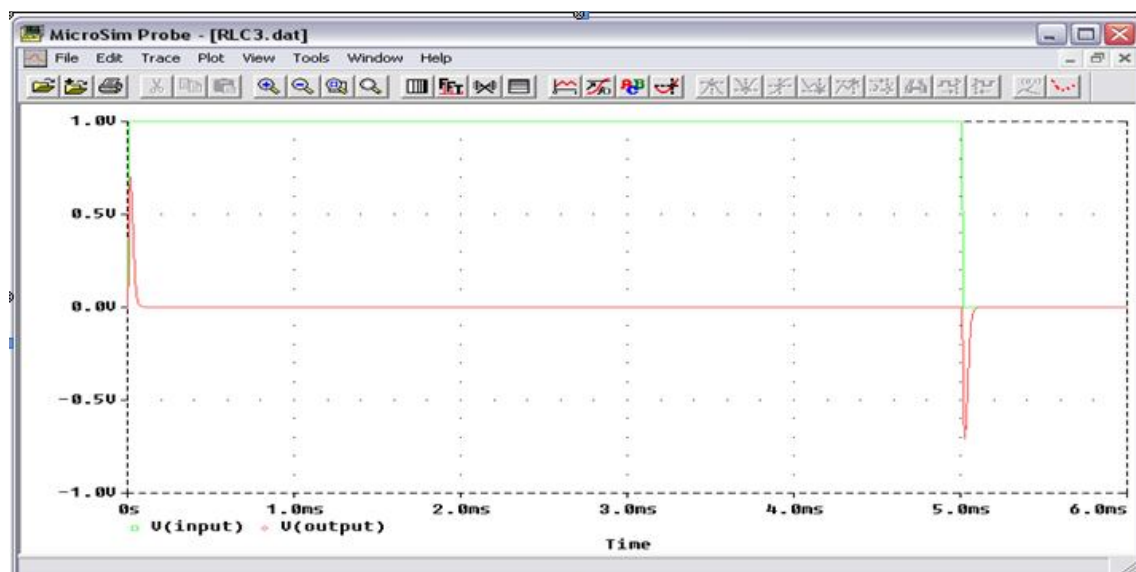


Рис.14. Результаты временного анализа полосового фильтра при $D=1$.

Если коэффициент затухания $D=1$, имеет место критическое демпфирование. Результаты временного анализа схемы при $R1=20\text{ Ом}$, $C1=1\text{ мкФ}$ и $L1=100\text{ мкГн}$ показаны на рис. 14. Переходный процесс остается апериодическим, но длительность переходного процесса существенно ниже, чем в любом из случаев, когда $D>1$.

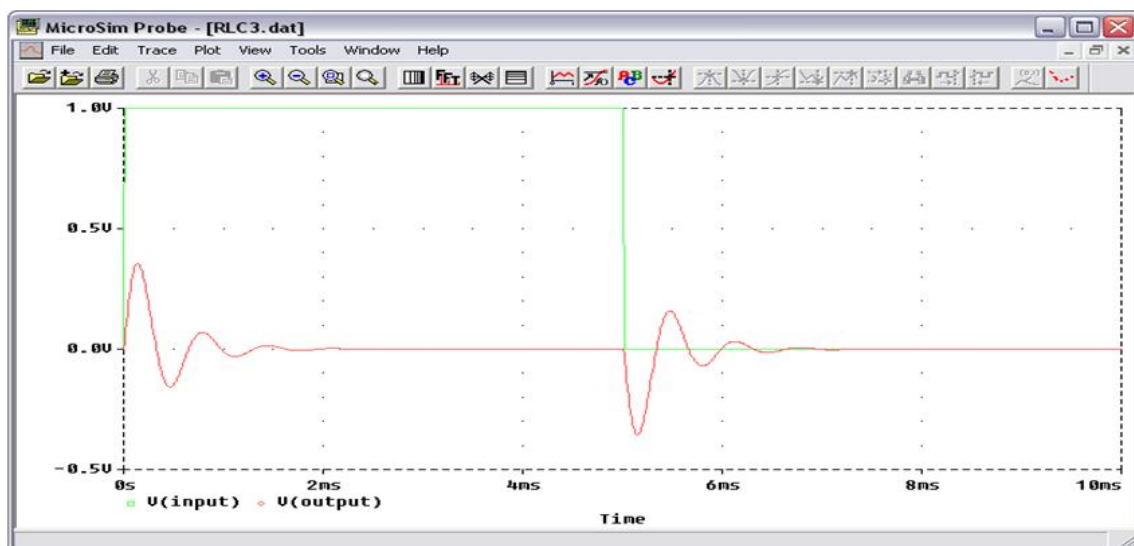


Рис.15. Результаты временного анализа полосового фильтра при $D < 1$.

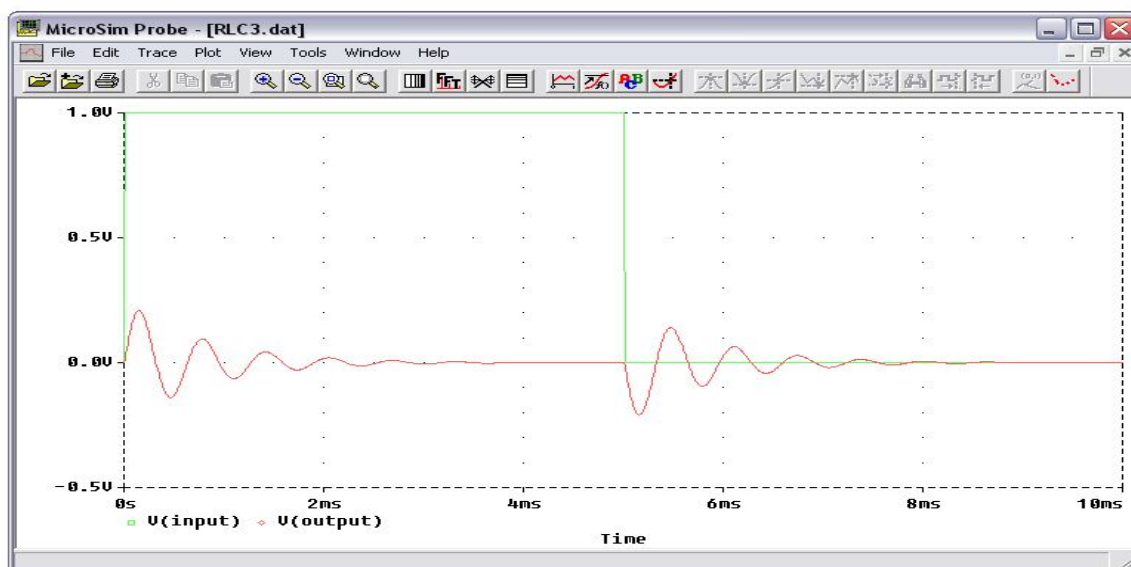


Рис.16. Результаты временного анализа полосового фильтра при $D \ll 1$.

Колебательный переходный процесс, рис. 15, получим, когда коэффициент затухания $D < 1$ (недодемпфирование), например, при $L1 = 100 \text{ мГн}$, $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$ и $R1 = 500 \text{ Ом}$. Задавая другие значения активного сопротивления, можно наглядно убедиться, рис. 16, что колебательность растет с уменьшением коэффициента затухания.

Завершая моделирование полосового фильтра, в дополнение к ранее сделанным выводам, отметим простоту планирования, выполне-

ния и анализа результатов модельных экспериментов, например, при изучении влияния параметров схемы на вид выходных зависимостей.

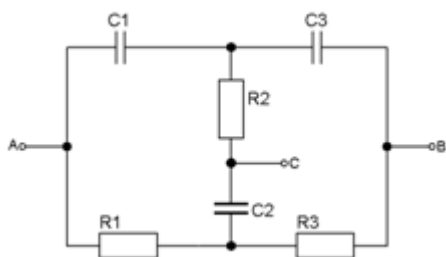


Рис.17. Схема фильтра-пробки.

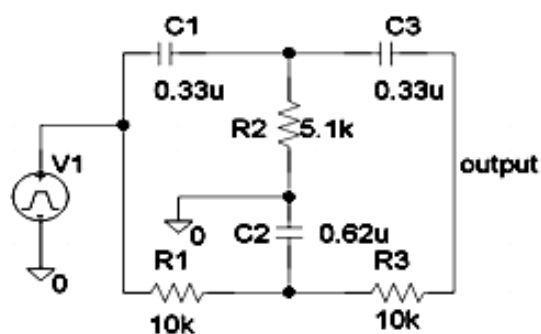


Рис.18. Схема фильтра-пробки
в программе Schematics.

Особый интерес для исследования представляют собой *узкополосные режсекторные фильтры* (так называемые *фильтры-пробки*). Такие фильтры предназначены для исключения «нежелательных» частотных составляющих, например, переменной составляющей 50 Гц в выходных сигналах источников питания медицинских и научных приборов. Так, для регистрации истинной формы сигнала электрокардиограммы, максимальная амплитуда которого составляет порядка 1 мВ, требуется полоса пропускания от 0,05 до 100 Гц. Присутствие составляющей с частотой 50 Гц от сети переменного тока в середине полосы пропускания нежелательно.

Ниже для фильтра-пробки, рис. 17 и рис. 18, приведен аналитический расчет и выполнен компьютерный частотный анализ, рис. 19.

Математический вывод уравнения *передаточной функции* фильтра-пробки и уравнения его *переходной характеристики* рассмотрено в [3].

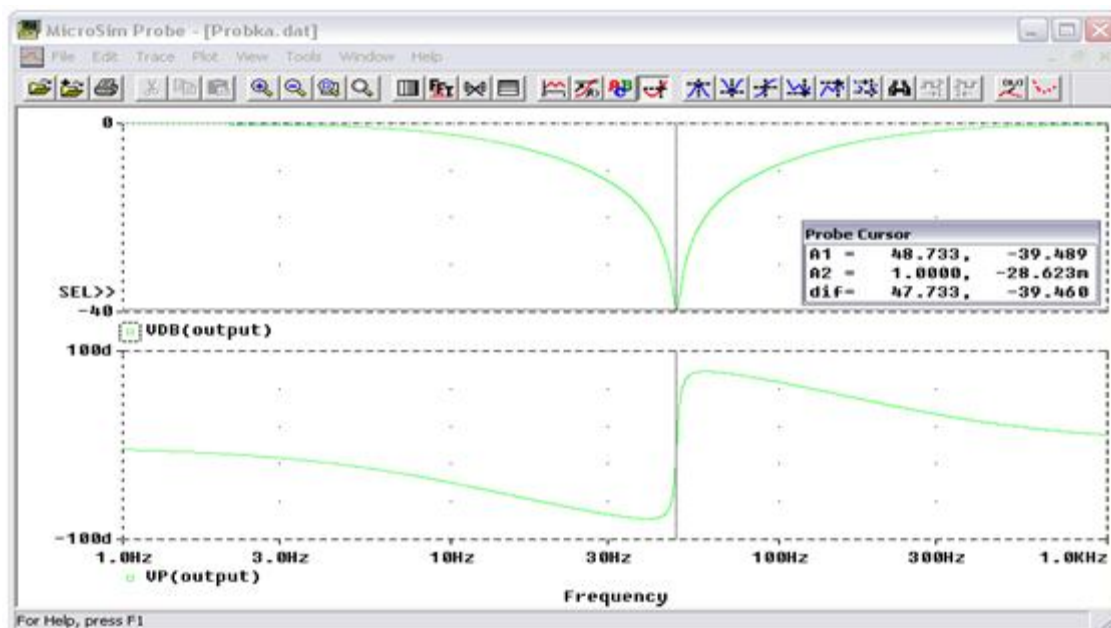


Рис.19. АЧХ и ФЧХ рассчитанного фильтра-пробки.

Центральная частота фильтра-пробки определяется уравнением

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C1 + C3}{C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot R1 \cdot R3}}.$$

Принимая $C1 = C3 = C$, $R1 = R3 = R$, $C2 = 2C$ и $R2 = 0,5R$, получим

$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$. Так как фильтр должен подавлять составляющие выходного сигнала с частотой 50 Гц, принимаем $f_c = 50$ Гц, и, полагая $R = 10$ кОм, найдем $C = \frac{1}{2\pi R f_c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 50} = 0,33$ мкФ.

Таким образом, номиналы элементов равны: $C1 = C3 = 0,33$ мкФ, $R1 = R3 = 10$ кОм, $C2 = 0,62$ мкФ, $R2 = 5,1$ кОм.

Как видно из рисунка 18, на частоте 48,733 Гц достигается максимальное ослабление сигнала. Коэффициент ослабления сигнала в данном случае составляет примерно 39,5 дБ. Этот результат является вполне удовлетворительным, поскольку исследуемая двойная Т-образная схема узкополосного режекторного фильтра позволяет достичь значения глубины режекции от -30 до -50 дБ.

На практике незначительное отклонение фактической центральной частоты от расчетного значения обусловлено тем, что номиналы элементов схемы фильтра выбираются из ряда стандартизации E24 [12] и имеют отклонения от расчетных значений. Изучение этих взаимосвязи отклонений и параметров элементов схемы и может составить содержание модельного эксперимента.

Выводы

Результаты моделирования RC и RLC-цепей в системе *DesignLab* устойчиво совпадают с аналитическими расчетами, что подтверждено рассмотренными примерами моделирования.

Система DesignLab обладает рядом немаловажных потенциалов в области моделирования и анализа параметров электрических цепей, а именно:

- имеет достаточно удобный и интуитивно понятный интерфейс, не перегруженный узкоспециальными функциями;
- обеспечивает визуализацию, получаемых результатов, что способствует глубокому их анализу;
- позволяет проводить непосредственное моделирование временных и частотных зависимостей проектируемых РЭУ, в отличие, например, от системы P-CAD, которая не имеет в своем составе программ моделирования аналоговых и цифровых устройств;
- имеет достаточно широкий набор режимов моделирования, в том числе статистический анализ, анализ влияния температуры, расчет передаточных функций, в отличие, например, от пакета прикладных программ Electronics Workbench.

Предложенная методика получения частотных и временных характеристик РЭУ на основе системы DesignLab может быть полезна при самостоятельном изучении ТОЭ и ТАУ.

Библиографический список

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с. – (Серия: Специалист)
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М. : Высш. школа, 1988.
3. Бриндли К., Карр Дж. Карманный справочник инженера электронной техники /Пер. с англ. 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 480 с.: ил.
4. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера-схемотехника. – М.: Техносфера, 2008. – 608 с.
5. Антипенский Р.В., Фадин. А.Г. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств. – М.: Техносфера, 2007. – 128 с.
6. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC.- М. : СОЛОН-Р, 2001.
7. Разевиг В. Электронная лаборатория – Internet:
<http://softline.perm.ru/interactive/articles/art1.htm>
8. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 720 с.: ил.
9. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: практикум на Electronics Workbench: в 2 т. /под общ. ред. Д.И. Панфилова – Т.1: Электротехника. – М.: ДОДЭКА, 1999. – 304 с., Т.2 : Электроника. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 288 с.
10. Цвеляя И. А. Использование системы компьютерного моделирования Electronics Workbench при изучении электротехнических дисциплин в неинженерных ВУЗах –Internet:
<http://bitpro.aha.ru/ITO/ITO98/2/TSVELAJA.html>.

11. Приваленков Ю.П. Михайлов А.С. Моделирование динамики двигателей постоянного тока: Электронный журнал "Научный вестник КГТУ" – Internet: <http://vestnik.kstu.edu.ru/13/viewnumber.aspx>
12. ГОСТ 28884-90. Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартиформ., 2006. – 8 с.

YU.P. Privalenkov, A.S. Mikhailov

Ю.П. Приваленков

А.С. Михайлов