

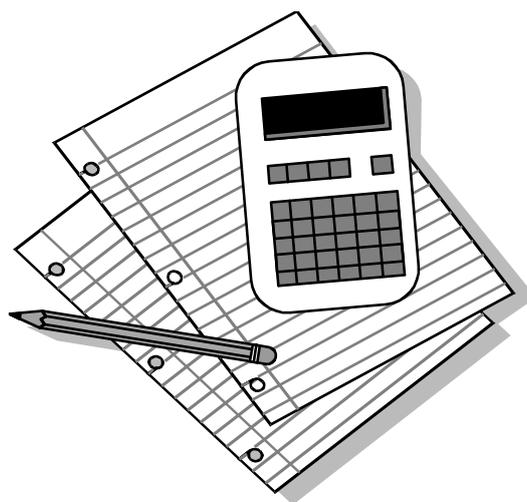


Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

Д.В. Озёркин

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Компьютерный лабораторный практикум для студентов специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»



ТОМСК 2012

Министерство образования и науки
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой КИПР

В.Н. ТАТАРИНОВ

“___” _____ 20__ г.

Д.В. Озёркин

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Компьютерный лабораторный практикум для студентов специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»

Рецензент: доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.ф.-м.н. Козлов В.Г.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.т.н. Озёркин Д.В.

Озёркин Д.В.

Теория надежности. Компьютерный лабораторный практикум для студентов специальностей 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 127 с.

В настоящем компьютерном лабораторном практикуме по дисциплине «Теория надежности» основными «инструментами» для выполнения лабораторных работ выступают программа автоматизированных математических расчетов MathCAD и программа схемотехнического моделирования MicroCAP.

© Озёркин Д.В., 2012

© Кафедра КИПР Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Назначение компьютерного лабораторного практикума	4
Особенности компьютерного лабораторного практикума.....	6
Сведения для студентов, обучающихся с применением дистанционных технологий.....	7
Общие методические рекомендации по выполнению лабораторного практикума.....	9
Типовые приемы работы в MathCAD, необходимые для выполнения лабораторных заданий.....	12
Типовые приемы работы в MicroCAP, необходимые для выполнения лабораторных заданий.....	26
1 Лабораторная работа №1 – Статистические исследования производственных погрешностей параметров РЭА по методу Монте-Карло.....	46
1.1 Цель работы	46
1.2 Порядок выполнения работы.....	46
1.3 Постановка задачи статистического анализа элементов на ЭВМ.....	46
1.4 Пример статистического анализа по методу Монте-Карло.....	56
1.5 Лабораторное задание.....	66
1.6 Контрольные вопросы.....	67
1.7 Варианты заданий.....	68
2 Лабораторная работа №2 – Полный факторный эксперимент при анализе надежности технических систем.....	72
2.1 Цель работы.....	72
2.2 Порядок выполнения работы.....	72
2.3 Основные понятия планирования эксперимента.....	72
2.4 Пример факторного эксперимента в исследовании активного фильтра низких частот.....	80
2.5 Лабораторное задание.....	89
2.6 Контрольные вопросы.....	89
2.7 Варианты заданий.....	90
Список литературы.....	94
Приложение 1 – Некоторые встроенные функции MathCAD.....	95
Приложение 2 – Некоторые сообщения об ошибках, выдаваемые программой MathCAD.....	100
Приложение 3 – Справочные сведения о программе схмотехнического моделирования MicroCAP.....	108
Приложение 4 – Шаблоны целевых функций, встроенные в MicroCAP..	115
Приложение 5 – Некоторые сообщения об ошибках, выдаваемые программой MicroCAP.....	117
Приложение 6 – Пример оформления отчета по лабораторной работе...	120
Приложение 7 – Соответствие условных графических	

обозначений некоторых ЭРЭ в россии и за рубежом.....130

НАЗНАЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Рост требований к надежности создаваемых электронных систем обусловлен их совершенствованием (усложнением выполняемых функций в связи с решением принципиально новых задач, снижением относительных производственных и эксплуатационных затрат). Проблема надежности воспринимается тем острее, чем больший урон (экономический, политический, моральный) может быть причинен потерей работоспособности устройства или системы.

Борьба за безотказность электронного оборудования требует такой организации процесса его создания, при которой надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) закладывается уже на ранних этапах проектирования. Потенциально дефектные элементы также должны выявляться на ранних стадиях реализации или испытаний электронных систем.

Поскольку перспективные радиоэлектронные комплексы должны гарантировать работоспособность в течение длительного времени, традиционные методы непосредственных испытаний и нормирования надежности показателей РЭА и комплектующих ее изделий становятся не только чрезмерно трудоемкими и дорогими, но и бесперспективными из-за низкой достоверности результатов, большой длительности испытаний, запаздывания информации. Отсюда – целесообразность применения различных методов моделирования и, прежде всего, – схемотехнического метода. Традиционные статистические подходы при этом остаются необходимыми для обработки информации о результатах моделирования, ускоренных испытаний, отбраковки и анализа показателей. Правильная классификация экспериментальных данных о компонентах надежности РЭА позволяет также эффективно применять аппарат статистической теории и теории планирования эксперимента для прогностического моделирования РЭА новых поколений.

В настоящем лабораторном практикуме предполагается для целей моделирования использовать два широко распространенных программных комплекса:

- математическое моделирование осуществляется системой MathCAD;
- схемотехническое моделирование – системой MicroCAP.

Совместное использование программных комплексов позволяет полнее представить изучаемый аспект теории надежности за счет различных языков описания объекта моделирования.

Программа MathCAD – наиболее популярное математическое приложение, в отличие от большинства других построено в соответствии с принципом WYSIWYG («What You See Is What You Get - Что Вы видите, то и получите»). Достаточно просто вводить математические выражения с помощью встроенного редактора формул, причем в виде, максимально приближенном к общепринятому, и тут же получать результат.

Выбор программы схемотехнического моделирования MicroCAP также не случаен. К основным достоинствам программного продукта в плане его использования в лабораторных работах следует отнести:

- минимальные аппаратные требования к ЭВМ – программа гарантированно работает даже на компьютерах с процессором Pentium первого поколения;
- исключительно схемотехническая направленность программы, ее сбалансированность для целей настоящего лабораторного практикума.

Почти все другие программные продукты схемотехнического моделирования (DesignLab, OrCAD, MultiSim) обладают еще возможностями топологического проектирования, что в данном случае можно считать недостатком. Такие программные комплексы гораздо сложнее в освоении студентами и требовательнее к аппаратным ресурсам.

Основное назначение лабораторного практикума – изучение методов статистического анализа и планирования эксперимента как эффективных способов для анализа отказов радиоаппаратуры в теории надежности. Кроме этого, компьютерный лабораторный практикум способствует приобретению студентами специальностей 210201 и 160905 серьезных навыков в построении математических моделей и в схемотехническом моделировании. Практикум может также использоваться студентами других специальностей, учебный план которых включает дисциплину «Теория надежности», либо ее аналоги с другими наименованиями.

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Компьютерный лабораторный практикум базируется на материале, изучаемом в лекционном курсе «Теория надежности» студентами специальностей 210201 и 160905. Заметим, что дисциплина «Теория надежности» из ряда регионально-вузовских компонентов, причем для студентов специальности 210201 она является дисциплиной по выбору («Теория надежности / Тепло-массообмен»).

Согласно учебных планов время, выделенное на выполнение лабораторных работ, одинаково для всех форм обучения обеих специальностей и составляет 9 часов. Предполагается, что за эти часы студенты проделают две работы:

1. Статистические исследования производственных погрешностей параметров РЭА по методу Монте-Карло.
2. Полный факторный эксперимент при анализе надежности технических систем.

Описанию лабораторных работ предшествуют два раздела по демонстрации всех типовых приемов, которые необходимы для выполнения лабораторных заданий. Для удобства такие типовые приемы озаглавлены, пронумерованы и сгруппированы отдельно для программы MicroCAP и для программы MathCAD. Затем, в описаниях лабораторных работ даются соответствующие ссылки на типовые приемы, для того чтобы не акцентировать внимание на технических подробностях при изложении основного материала. Следовательно, демонстрационные разделы настоящего компьютерного лабораторного практикума можно рассматривать и как краткое учебное пособие по применению MathCAD и MicroCAP, и как справочный материал. Разделы снабжены максимально подробными разъяснениями и иллюстрациями.

В описаниях лабораторных работ включены две обязательные части – краткие теоретические сведения по теме работы и методический пример по выполнению лабораторного задания. Краткие теоретические сведения, предваряющие лабораторное задание, позволяют студентам вспомнить материал лекционного курса без специального поиска нужного раздела в учебном пособии. Методический пример к каждой работе представляет собой аналог соответствующего лабораторного задания. Таким образом, задача студентов сводится к повторению представленного методического примера, но по своему варианту задания.

В конце компьютерного лабораторного практикума приведены дополнительные справочные материалы.

СВЕДЕНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, ОБУЧАЮЩИХСЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для выполнения лабораторных работ следует иметь:

1. Настоящий лабораторный практикум.
2. Дистрибутивный архив с программой MathCAD 2001.
3. Дистрибутивный архив с программой MicroCAP 7.
4. Дополнительную библиотеку с математическими моделями отечественных радиоэлементов (операционные усилители), поскольку они не входят в стандартную поставку программы MicroCAP.

Порядок выполнения лабораторных работ решающего значения не имеет.

Источники приобретения программного обеспечения (MathCAD и MicroCAP) в России широко известны и поэтому здесь не комментируются. Если в Вашем случае возникли принципиальные трудности с поиском указанных программных продуктов, то в качестве варианта можно обратиться за помощью к преподавателю информатики ТУСУРа, который проводит выездные сессии в Вашем регионе.

Не следует пользоваться демонстрационными версиями программы MicroCAP (Evaluation version), которые доступны для бесплатного копирования с Web-сервера фирмы-разработчика. В демонстрационных версиях введены некоторые ограничения, в частности, невозможность построения целевых функций и невозможность многовариантных видов анализа. Эти обстоятельства не позволяют использовать демонстрационные версии программы для выполнения лабораторных заданий.

Выполнять лабораторные задания можно в более ранних полнофункциональных версиях MicroCAP: версия 6 и версия 5 (вторая редакция). Однако такой способ можно рекомендовать студентам, хорошо знакомым с интерфейсом этих версий, который несколько отличается от седьмой версии программы.

Библиотека математических моделей отечественных операционных усилителей представляет собой обычный текстовый файл `mu_oramp.lib`, где на входном языке формата SPICE приводится описание элемента. Особенности подключения математической модели операционного усилителя разъяснены в разделе «Типовые приемы работы в MicroCAP, необходимые для выполнения лабораторных заданий». Электронный файл с библиотекой математических моделей операционных усилителей входит в комплект рассылки вместе с лабораторным практикумом. Вообще этот файл можно получить по электронной почте, сделав соответствующий запрос по адресу kipr@tusur.ru.

Номер варианта выбирается по общепринятым правилам в дистанционном образовании по формуле:

$$V = (25 \cdot k) \operatorname{div} 100,$$

где V – искомый номер варианта (при $V = 0$ выбирается номер варианта 25); k – две последние цифры номера Вашей зачетной книжки; div – операция целочисленного деления.

При отправке отчетов по лабораторным работам следует указывать свой номер варианта. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в Приложении 6. Отчет по лабораторной работе обязательно должен быть в виде твердой копии, при этом допускается как рукописный, так и печатный текст отчета. Аргументами в пользу представления отчета в виде твердой копии являются следующие причины:

- исключение возможности получения компьютерных вирусов;
- снятие проблем технического характера, связанных с поврежденными архивами или архивами неизвестного формата;
- снятие проблем, связанных с прочтением документа или его части из-за применения нестандартных средств оформления;
- снятие проблем, связанных с проверкой, рецензированием и исправлениями отчета, а особенно его графической части.

Распространенной ошибкой в отчетах является неполное оформление графиков. Графики функций всегда должны иметь единицы измерения по осям, правильный масштаб, поясняющие подписи, дополнительные построения (если это требует лабораторное задание). В связи с этим не нужно бояться на полученной твердой копии графика наносить от руки дополнительную информацию. Ответы на контрольные вопросы содержатся в теоретической части описании лабораторной работы.

Вопросы **технического** характера, возникающие при выполнении лабораторных работ, Вы можете отправить по электронному адресу kipr@tusur.ru.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Предполагается, что студент должен обладать начальными навыками и умениями работы в программах MathCAD и MicroCAP, полученные им в курсе «Информатика». В связи с этим в настоящем лабораторном практикуме остались *вне* рассмотрения следующие вопросы:

- для программы MathCAD: состав и назначение пунктов меню; состав и назначение панелей инструментов; основные принципы написания математических выражений и их вычисление; построение графиков функций;

- для программы MicroCAP: состав и назначение пунктов меню; состав и назначение панели инструментов в режимах изображения схемы и анализа графиков; приемы изображения электрических схем; виды схемотехнического анализа и их запуск.

Если Вы по какой-либо причине не владеете перечисленными знаниями и навыками работами, то целесообразно обратиться сначала к [1, 2], а затем уже к настоящему лабораторному практикуму. Перед выполнением лабораторных заданий рекомендуется ознакомиться с разделами «Типовые приемы работы в MathCAD, необходимые для выполнения лабораторных заданий» и «Типовые приемы работы в MicroCAP, необходимые для выполнения лабораторных заданий»; полезно также воспроизвести примеры из этих разделов на компьютере.

С точки зрения выполнения лабораторных заданий можно дать два практических совета при работе в MathCAD.

Некоторые лабораторные задания предполагают написание программных циклов при помощи панели инструментов «Программирование» для нахождения численным способом некоторого результата. Как и в любой системе программирования, особое внимание в MathCAD следует уделять «бесконечным» циклам или циклам с большим количеством итераций. Такие циклы появляются, как правило, в результате ошибочных действий пользователя и приводят к зависанию компьютера с потерей всей несохраненной информации. Поэтому перед написанием *любого* программного фрагмента при помощи панели **Programming** (Программирование) следует обязательно сохранить промежуточные результаты своей работы.

Второй практический совет связан с переносом через буфер обмена математических выражений или программных фрагментов в текстовое приложение, например Microsoft Word. При этом часто возникает ситуация, когда после печати текстового документа в нем отсутствует конечный результат после символа «знак равенства», хотя в электронной версии текстового документа он есть. Решение указанной проблемы – промежуточное сохранение информации из буфера обмена в виде bmp-рисунка и последующее внедрение его в текстовый документ.

Для лучшей наглядности полезно графики функции в MathCAD представлять более жирным начертанием (по умолчанию графики вычерчиваются единичной толщиной). Изменить толщину линии графика можно, если выполнить следующие действия:

- 1) двойной щелчок по графику;
- 2) в появившемся диалоговом окне **Formatted Currently Selected X-Y Plot** (Форматирование выбранного графика в декартовой системе координат) переходим на вкладку **Traces** (Трассировки);
- 3) в выпадающем списке **Weight** (Вес), расположенном под соответствующим столбцом таблицы, устанавливаем числовое значение толщины линии для текущего графика.

Программа схемотехнического моделирования MicroCAP, также как и подавляющее большинство аналогичных программ, использует при работе вычислительные алгоритмы, математические модели и входной язык формата SPICE. На текущий момент формат SPICE стал фактически общепризнанным стандартом для программ схемотехнического моделирования.

Приведем несколько практических советов при работе в программе схемотехнического моделирования MicroCAP.

Программа MicroCAP сохраняет результаты работы в файлы с расширением *.cir. Распространенной ошибкой является попытка сохранить непосредственно графики зависимостей, полученные в результате моделирования. Такая попытка будет неудачна, поскольку в режиме отображения графиков пункт меню *Save* всегда заблокирован. Следует помнить, что основная информация, которая сохраняется в рабочем файле *.cir – это не графики функций, а схема электрическая принципиальная вместе с индивидуальными настройками и установками на проведение какого-либо моделирования. Таким образом, всегда нужно сначала закрыть окно с графиками зависимостей, а затем уже приступать к сохранению информации и выходу из программы. Если во время следующего сеанса работы открыть сохраненный файл и произвести запуск на моделирование – получим первоначальные графики зависимостей.

Если есть необходимость перенести изображение графика функции в какое-либо приложение, например в текстовый редактор Microsoft Word, то проще всего это сделать через буфер обмена по команде *Edit/Copy to Clipboard/Copy the Visible Portion of Window in BMP Format*.

Полезно при работе в программе MicroCAP сохранять промежуточные результаты своей работы с периодичностью в 15-20 минут для того, чтобы не потерять всю информацию. Особенно важно это перед первым запуском на моделирование – в случае неправильного задания параметров иногда возникает аварийная ситуация и программы MicroCAP «зависает».

При выполнении лабораторных работ следует стремиться, чтобы каждое новое частное задание располагалось в отдельном файле, даже если схема включения одинакова. В противном случае, можно очень легко запутаться в многочисленных установках параметров на моделирование, которые в каждом новом задании имеют индивидуальные особенности. Несоблюдение это-

го правила может привести к тому, что вместо ожидаемого результата появится совсем иной – например, вместо одного графика функции появится семейство.

Следует помнить, что математическая модель операционного усилителя основана на своем реальном прототипе, поэтому наследует большинство его признаков и свойств. Для нормального функционирования модели операционного усилителя необходима подача питающего напряжения, причем правильной полярности. Модель операционного усилителя, также как и реальный прототип, обладает ограничениями по величинам входного и выходного напряжения и тока. В принципе невозможно получить на выходе операционного усилителя значение напряжения большее, чем напряжение питания.

При изображении электрических схем в MicroCAP необходимо выполнение следующих условий:

- выводы электрорадиоэлементов (ЭРЭ) должны быть подключены к электрическим проводникам;
- электрические проводники не должны иметь разрывов (за исключением прокладки скрытых цепей);
- любая электрическая схема должна иметь символ общего проводника (проводник с нулевым потенциалом);
- большинство электрических схем должны иметь на входе источник сигнала (за исключением схем автогенераторов, мультивибраторов и т.д.);
- любая электрическая схема, содержащая активные ЭРЭ, должна иметь источник питания.

При проведении моделирования по постоянному току программа MicroCAP интерпретирует емкости как разрывы в электрической цепи, а индуктивности – как обычные проводники.

При составлении символических и математических выражений в MicroCAP указание на какой-либо ЭРЭ производится по его позиционному обозначению на электрической схеме. Несоответствие позиционного обозначения ЭРЭ на схеме и в выражении всегда вызывает сообщение об ошибке.

Сообщения об ошибках выводятся в программе MicroCAP на английском языке, поэтому не всегда информативны и понятны. В любом случае следует внимательно прочесть такое сообщение и постараться устранить причину, вызвавшую появление ошибки. В Приложении 5 приведены основные (типичные) сообщения об ошибках программы MicroCAP.

ТИПОВЫЕ ПРИЕМЫ РАБОТЫ В MATHCAD, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАДАНИЙ

Прием №1. Генерация случайных величин с нормальным законом распределения.

Для моделирования различных физических, экономических и прочих эффектов широко распространены методы, называемые методами Монте-Карло. Их основная идея состоит в создании определенной последовательности случайных чисел, моделирующей тот или иной эффект, например шумов в физическом эксперименте, случайную динамику биржевых индексов и т.п. Для этих целей в MathCAD встроен ряд генераторов псевдослучайных чисел.

Согласно определению, случайная величина принимает то или иное значение, но какое конкретно, зависит от случайных обстоятельств опыта и заранее точно предсказано быть не может. Можно лишь говорить о вероятности $P(X)$ принятия случайной дискретной величиной того или иного значения x_i , или о вероятности $P(x \leq X \leq x + \Delta x)$ попадания непрерывной случайной величины в тот или иной числовой интервал $(x, x + \Delta x)$. Вероятность $P(X)$ или $P(x \leq X \leq x + \Delta x)$ может принимать значения от 0 (такое значение случайной величины совершенно невероятно) до 1 (случайная величина заведомо примет значение x_i или от x до $x + \Delta x$).

Большой интерес представляет наличие генераторов случайных чисел, создающих выборку псевдослучайных данных с нормальным законом распределения. В теории вероятности доказано, что сумма различных независимых случайных слагаемых (независимо от их закона распределения) оказывается случайной величиной, распределенной согласно нормальному закону (так называемая, центральная предельная теорема). Поэтому нормальное распределение хорошо моделирует самый широкий круг явлений, для которых известно, что на них влияют несколько независимых случайных факторов.

В MathCAD имеется встроенная функция для генерации независимых случайных чисел, распределенных по нормальному закону:

$$\text{rnorm}(N, M, \sigma),$$

где N – количество независимых случайных чисел; M – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение.

В нижеследующем листинге показан пример создания двух векторов по $N = 500$ элементов в каждом, с независимыми псевдослучайными числами x_{1i} , x_{2i} и распределенными согласно нормальному закону. О характере распределения случайных элементов векторов можно судить по рисунку 1.

$$\begin{aligned} N &:= 500 & M &:= 0 & \sigma &:= 1 \\ x1 &:= \text{rnorm}(N, M, \sigma) & x2 &:= \text{rnorm}(N, M, \sigma) \end{aligned}$$

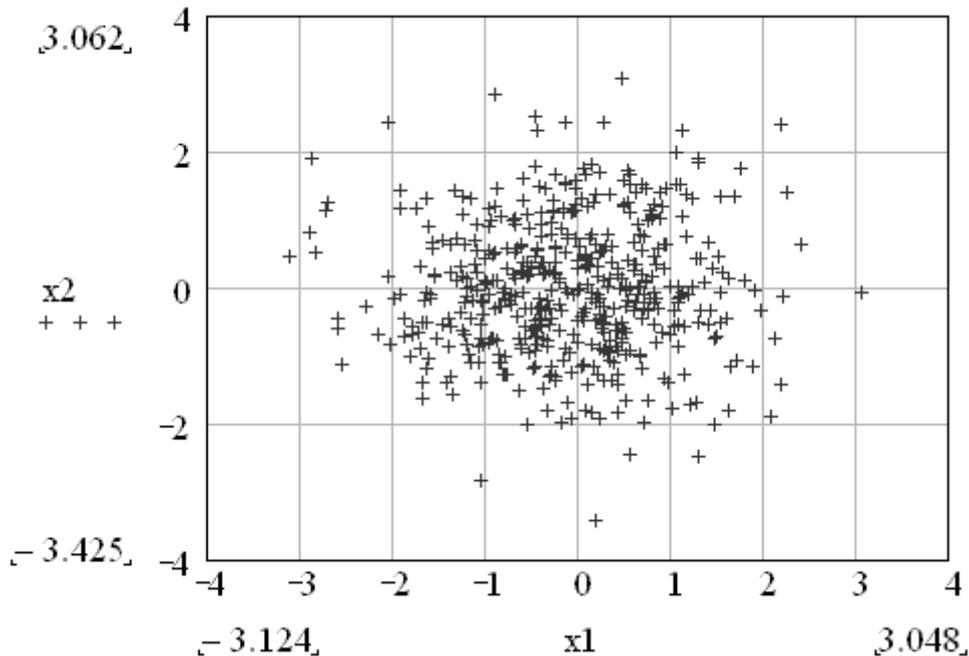


Рисунок 1 – Псевдослучайные числа с нормальным законом распределения

Для представления значений случайных величин на поле графика в виде небольших крестиков необходимо выполнить следующие действия:

1. Двойной щелчок на поле графика.
2. В появившемся диалоговом окне **Formatted Currently Selected X-Y Plot** переходим на вкладку **Traces**.
3. В выпадающем списке под столбцом таблицы **Symbol** (Символ) выбираем значение '+'. В выпадающем списке под столбцом таблицы **Type** (Тип) выбираем значение **points** (точки).
4. Для большей наглядности на вкладке **X-Y Axes** (Оси X-Y) того же диалогового окна включаем опции **Grid Lines** (Вспомогательные линии) в первой и второй колонке.
5. Завершение действий подтверждаем нажатием на кнопку **ОК**.

Прием №2. Программирование.

Программные модули внутри документа MathCAD сочетают в себе и обособленность (их легко отличить от остальных формул), и простоту смыслового восприятия. Несмотря на небольшое число операторов, язык программирования MathCAD позволяет решать самые различные, в том числе и довольно сложные, задачи и является серьезным подспорьем для расчетов.

Для вставки программного кода в документы MathCAD имеется специальная панель инструментов **Programming**. Большинство кнопок этой панели выполнено в виде текстового представления операторов программирования, поэтому их смысл легко понятен. Программирование имеет ряд существенных преимуществ, которые делают документ более простым и читаемым:

- возможность применения циклов и условных операторов;

- простота создания функций и переменных, требующих нескольких простых шагов;

- возможность создания функций, содержащих закрытый для остального документа код, включая преимущества использования локальных переменных и обработку исключительных ситуаций (ошибок).

Программный модуль обозначается в MathCAD вертикальной чертой, справа от которой последовательно записываются операторы языка программирования. Вставить строку программного кода в уже созданную программу можно в любой момент с помощью кнопки **Add Line** (Добавить линию), расположенной на панели **Programming**. Для этого следует предварительно поместить на нужное место внутри программного модуля линию ввода. Для желаемого размещения линий ввода внутри формулы можно использовать не только мышь и клавиши со стрелками, но и пробел. С помощью последовательных нажатий пробела линии ввода «захватывают» разные части формулы. Необходимость вставки новой линии ввода в уже существующий программный код продемонстрирована в нижеследующем примере.

$$f(x) := \left| \begin{array}{l} \text{"negative"} \text{ if } x < 0 \\ \text{if } x > 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{"positive"} \\ \text{"big positive"} \text{ if } x > 1000 \end{array} \right. \\ \text{"zero"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

$$f(1) = \text{"positive"}$$

$$f(10^5) = \text{"big positive"}$$

Новая вертикальная черта с двумя линиями выделяет фрагмент программы, который относится к условию $x > 0$, находящемуся в его заголовке. В режиме выполнения программы, а это происходит при любой попытке вычислить $f(x)$, выполняется последовательно каждая строка кода. Например, в предпоследней строке примера вычисляется $f(1)$. Рассмотрим работу каждой строки кода этого листинга.

1. Поскольку $x = 1$, то условие $x < 0$ не выполнено, и в первой строке ничего не происходит.

2. Условие второй строки $x > 0$ выполнено, поэтому выполняются обе следующие строки, объединенные короткой вертикальной чертой в общий фрагмент.

3. Функции $f(x)$ присваивается значение $f(1) = \text{"positive"}$.

4. Условие $x > 1000$ не выполнено, поэтому значение "big positive" не присваивается функции $f(x)$, она так и остается равной строке "positive" .

5. Последняя строка не выполняется, т.к. одно из условий ($x > 0$) оказалось истинным, и оператор *otherwise* (иначе) не понадобился.

Таким образом, основной принцип создания программных модулей заключается в правильном расположении строк кода. Ориентироваться в их

действию довольно легко, т.к. фрагменты кода одного уровня сгруппированы в программе с помощью вертикальных черт.

Действие условного оператора *if* состоит из двух частей. Сначала проверяется логическое выражение (условие) справа от него. Если оно истинно, выполняется выражение слева от оператора *if*. Если ложно – ничего не происходит, а выполнение программы продолжается переходом к ее следующей строке. Вставить условный оператор в программу можно следующим образом:

1. Создать новую строку программного кода, нажав на панели **Programming** кнопку **Add Line**.

2. Нажать кнопку условного оператора *if*.

3. Справа от оператора *if* ввести условие.

4. Выражение, которое должно выполняться, если условие оказывается истинным, ввести слева от оператора *if*.

5. Если в программе предусматриваются дополнительные условия, добавить в программу еще одну строку нажатием кнопки **Add Line** и ввести эти условия таким же образом, используя оператор *if* или *otherwise*.

Оператор *otherwise* используется совместно с одним или несколькими условными операторами *if* и указывает на выражение, которое будет выполняться, если ни одно из условий не оказалось истинным.

Язык программирования MathCAD не был бы эффективным, если бы не позволял создавать внутри программных модулей локальные переменные, которые «не видны» извне, из других частей документа. Присваивание в пределах программ, в отличие от документов MathCAD, производится с помощью оператора локального присваивания, который вставляется нажатием кнопки ← на панели **Programming**. Ни оператор присваивания :=, ни оператор вывода = в пределах программ не применяются. Локальное присваивание иллюстрируется нижеследующим примером.

$$f(x) := \left| \begin{array}{l} z \leftarrow 4 \\ z + x \end{array} \right.$$

$$f(1) = 5$$

Переменная *z* существует только внутри программы, выделенной вертикальной чертой. Из других мест документа получить ее значение невозможно.

В языке программирования MathCAD имеются два оператора цикла: *for* и *while*. Первый из них дает возможность организовать цикл по некоторой переменной, заставляя ее пробегать диапазон значений. Второй создает цикл с выходом из него по некоторому логическому условию. Чтобы вставить в программный модуль оператор цикла *while* необходимо:

1. Создать в программном модуле новую линию.

2. Вставить оператор цикла *while* нажатием одноименной кнопки на панели **Programming**.

3. Вставить в соответствующий местозаполнитель логическое выражение, при нарушении которого должен осуществляться выход из цикла.

4. В нижний местозаполнитель ввести тело цикла, т.е. выражения, которые должны выполняться циклически.

5. При необходимости дополнить программу другими строками и ввести в них нужный код.

Пример использования циклического оператора *while* показан ниже.

```
x := | z ← 0
      | while z < 10
      | z ← z + 1
```

x = 10

Прием №3. Построение частотных характеристик электрических цепей.

Простейшая схема интегратора, выполненная на операционном усилителе (ОУ) К140УД17, приведена на рисунке 2. Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включен конденсатор C . Согласно справочным данным: коэффициент усиления ОУ на постоянном токе $K_{U0} = 2 \cdot 10^5$; постоянная времени ОУ $T_{OU} = 7.96 \cdot 10^{-3}$. Получим передаточную функцию интегратора при условии ограниченности полосы пропускания ОУ.

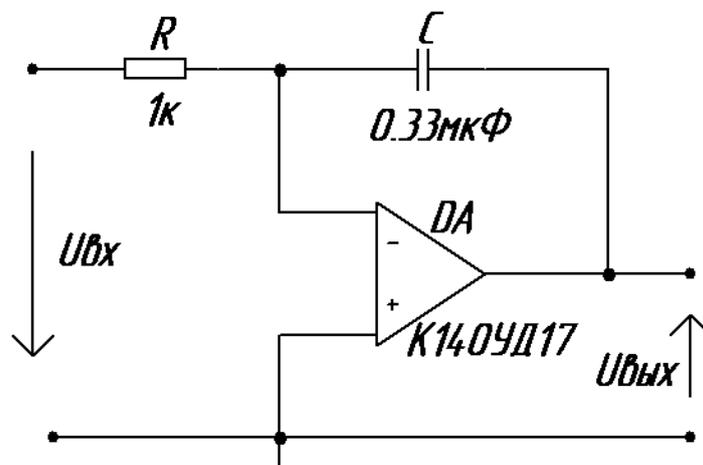


Рисунок 2 – Простейшая схема интегратора на операционном усилителе

Известно [3], что собственная передаточная функция ОУ имеет вид:

$$W_{OU} \approx \frac{K_{U0}}{T_{OU}p + 1},$$

где K_{U0} – собственный коэффициент усиления ОУ; T_{OU} – постоянная времени ОУ; p – комплексная частота.

Воспользуемся общим выражением для коэффициента передачи усилителя с цепью отрицательной обратной связи (ООС). Тогда для передаточной функции интегратора можно записать:

$$\begin{aligned}
 W_{II} & \stackrel{\sim}{=} W_{BX} \stackrel{\sim}{=} W_{OY_OOC} \stackrel{\sim}{=} \frac{1}{R + \frac{1}{Cp}} \cdot \frac{\frac{K_{U0}}{T_{OY} p + 1}}{1 + \frac{K_{U0}}{C_{OY} p + 1}} \cdot \frac{R}{\left(R + \frac{1}{Cp}\right)} = \\
 & = \frac{K_{U0}}{T_{OY} R C p^2 + C_{OY} + R C + K_{U0} R C} \cdot \frac{1}{p + 1}.
 \end{aligned}$$

Встроенная в MathCAD константа *ORIGIN* хранит начальный номер индекса при обращении к массивам. По умолчанию в системе MathCAD принято, что *ORIGIN* = 0. Однако для этого и последующего примера удобнее, чтобы индексация начиналась с единицы. В связи с этим в первой строке листинга произведено переназначение константы *ORIGIN*. Наименование константы должно быть написано **обязательно** прописными (заглавными) буквами.

Для построения логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) необходимо, чтобы значения аргумента (частоты) представляли собой геометрическую прогрессию. Пусть шаг геометрической прогрессии *Step* = 1.007; количество точек отсчета аргумента *N* = 2500. Тогда каждое новое значение аргумента будет вычисляться по формуле $f_j = Step^j$, где $j = 1, 2, \dots, N$. При этом диапазон значений аргумента [1.007 Гц; 37 469 369 Гц]. Для последующих расчетов удобно ввести вспомогательную табулированную функцию комплексной частоты $p_j = i \cdot 2\pi f_j$. Следует помнить, что в системе MathCAD мнимая единица вводится по нажатию кнопки *i* на панели **Calculator** (Калькулятор). Введенный с клавиатуры символ *i* или *j* система MathCAD воспринимает как переменную. Знак модуля вводится по нажатию кнопки $|x|$, а знак десятичного логарифма – по нажатию кнопки **log**; обе кнопки также расположены на панели **Calculator**.

ORIGIN := 1

Step := 1.007 *j* := 1..2500 $f_j := Step^j$ $p_j := i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j$

R := 1000 *C* := $0.33 \cdot 10^{-6}$ *Ku0* := $2 \cdot 10^5$ *Tou* := $7.96 \cdot 10^{-3}$

$$W_j := 20 \cdot \log \left[\left| \frac{Ku0}{Tou \cdot R \cdot C \cdot (p_j)^2 + (Tou + R \cdot C + Ku0 \cdot R \cdot C) \cdot p_j + 1} \right| \right]$$

Для отображения значений частоты в логарифмическом масштабе на графике (рисунок 3) следует:

- 1) выделить график;
- 2) двойным щелчком мыши вызвать диалоговое окно **Formatting Currently Selected X-Y Plot**;
- 3) на вкладке **X-Y Aces** включить опцию **X-Axis:Log Scale** (Ось X: Логарифмическая шкала).

Известно [3], что частота единичного усиления интегратора не зависит от собственного коэффициента усиления ОУ, а полностью определяется параметрами его внешней цепи. Для схемы интегратора на рисунке 2 частота единичного усиления будет равна:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 0.33 \cdot 10^{-6}} = 482 \text{ Гц}.$$

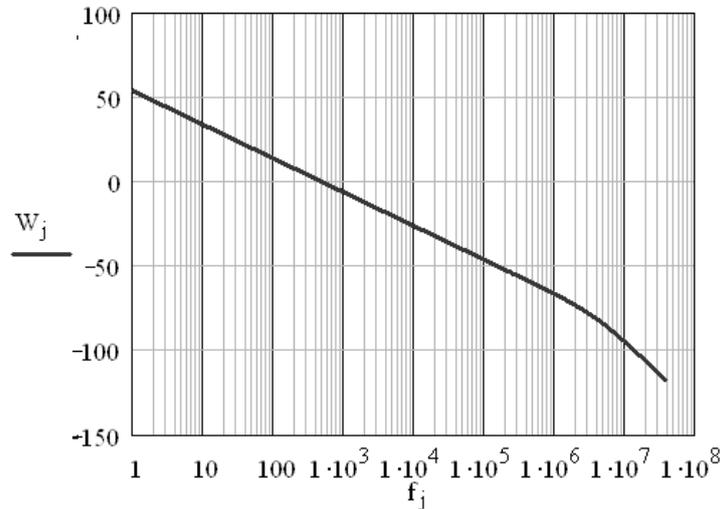


Рисунок 3 – ЛАЧХ интегратора

Подтвердим полученный результат численным способом. Для этого необходимо реализовать цикл с предусловием – увеличивать точки отсчета j , начиная с единицы, передвигаясь по оси абсцисс до тех пор, пока табулированная логарифмическая функция $W_j > 0$. Как только условие перестало выполняться, значит произошло пересечение с нулевой ординатой. При этом текущее значение отсчета $j = \text{Number}$ однозначно определяет единичную частоту: $\text{Freq} = \text{Step}^{\text{Number}}$. Из приведенного ниже листинга следует, что значение единичной частоты, полученное численным способом, практически совпадает с аналитическим результатом.

```

Number := | j ← 1
           | while Wj > 0
           |   j ← j + 1
           | j

```

```

Freq := StepNumber      Freq = 483.182

```

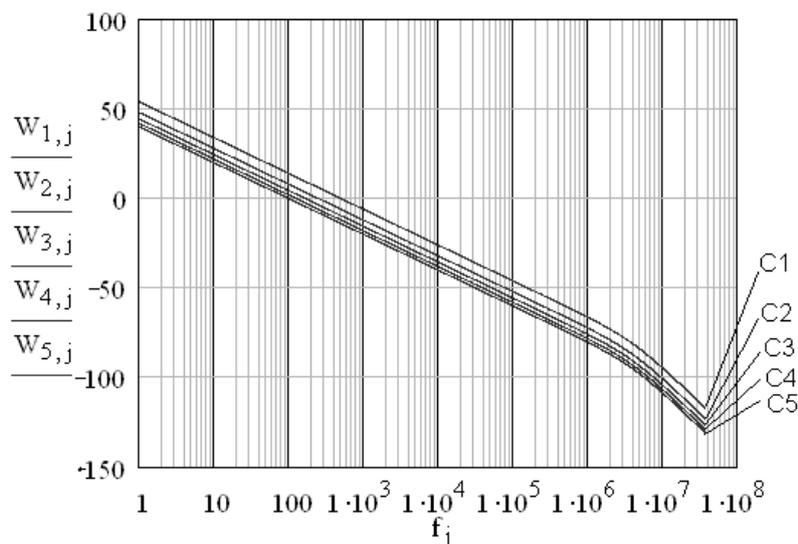
Прием №4. Построение семейства частотных характеристик для электрической цепи с варьируемым параметром.

Пусть в схеме интегратора (рисунок 2) варьируемым параметром выступает емкость конденсатора C , которая изменяется от 0.33 мкФ до 1.65 мкФ с шагом в 0.33 мкФ. В этом случае можно наблюдать семейство передаточных характеристик интегратора (семейство ЛАЧХ), для каждой из которых существует своя частота единичного усиления.

Ниже приведен листинг программы по расчету семейства ЛАЧХ. Расчет семейства характеристик в системе MathCAD сводится к заполнению соответствующими значениями элементов двумерного массива. Первая размерность k массива представляет собой варьируемые значения емкости конденсатора, а вторая размерность j – табулированные отсчеты для значений частоты (аналогично предыдущему примеру).

$$\begin{aligned} & \text{ORIGIN} := 1 \\ & \text{Step} := 1.007 \quad j := 1..2500 \quad f_j := \text{Step}^j \quad p_j := i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j \\ & R := 1000 \quad Ku0 := 2 \cdot 10^5 \quad Tou := 7.96 \cdot 10^{-3} \\ & k := 1..5 \quad C_k := 0.33 \cdot 10^{-6} \cdot k \\ & W_{k,j} := 20 \cdot \log \left[\left| \frac{Ku0}{Tou \cdot R \cdot C_k \cdot (p_j)^2 + (Tou + R \cdot C_k + Ku0 \cdot R \cdot C_k) \cdot p_j + 1} \right| \right] \end{aligned}$$

Удобство визуального представления такого двумерного массива обеспечивается построением графика (рисунок 4). Чтобы разместить несколько функций на одном графике, нужно с помощью символа <, > (запятая) зарезервировать слева от графика требуемое количество местозаполнителей. Заметим, что при записи табулированной функции W слева от графика первый индекс должен быть указан в виде константы.



$$C_1 = 0.33 \text{ мкФ}; C_2 = 0.66 \text{ мкФ}; C_3 = 0.99 \text{ мкФ};$$

$$C_4 = 1.32 \text{ мкФ}; C_5 = 1.65 \text{ мкФ}$$

Рисунок 4 – Семейство ЛАЧХ интегратора

По аналогии с предыдущим примером можно найти численным способом значения частот единичного усиления. Отличие заключается в том, что *Number* и *Freq* – векторные величины.

$$\text{Number}(k) := \begin{cases} j \leftarrow 1 \\ \text{while } W_{k,j} > 0 \\ \quad j \leftarrow j + 1 \\ j \end{cases}$$

$$\text{Freq}_k := \text{Step}^{\text{Number}(k)} \quad \text{Freq} = \begin{pmatrix} 483.182 \\ 242.211 \\ 161.616 \\ 120.572 \\ 97.125 \end{pmatrix}$$

Прием №5. Использование некоторых встроенных функций MathCAD для расчета числовых характеристик случайных величин.

В системе MathCAD 2001 имеются несколько встроенных функций для оценки числовых статистических характеристик рядов случайных данных. При выполнении лабораторных работ настоящего практикума потребуются лишь четыре встроенные функции:

- $\text{mean}(x)$ – выборочное среднее значение;
- $\text{stdev}(x)$ – среднеквадратичное (или «стандартное») отклонение;
- $\text{max}(x)$ – максимальное значение выборки;
- $\text{min}(x)$ – минимальное значение выборки;

где x – вектор с выборкой случайных данных.

Нижеприведенный листинг в MathCAD демонстрирует применение всех четырех статистических функций.

	0
0	-0.723
1	-0.517
2	0.558
3	-0.245
4	0.09
5	1.262
6	-0.706
$x =$ 7	$1.864 \cdot 10^{-3}$
8	1.108
9	0.893
10	-2.901
11	-2.157
12	0.206
13	-0.616
14	-1.198
15	0.099

$$\text{mean}(x) = -0.163$$

$$\text{stdev}(x) = 1.013$$

$$\text{max}(x) = 3.048$$

$$\text{min}(x) = -2.901$$

В начале листинга приведен фрагмент вектора x , содержащего значения случайной величины. Заметим, что размерность вектора x составляет не 16 (как можно подумать из представленного листинга), а 100 случайных вели-

чин. Из соображений компактности в программе MathCAD векторы и матрицы большой размерности выводятся на экран фрагментарно, для просмотра других значений используется полоса прокрутки (в представленном листинге она не видна).

Закон распределения случайной величины в данном случае для нас не важен. Важно то, что применение встроенных статистических функций дает возможность непосредственно (как в представленном листинге) или путем присваивания переменной оценить числовые характеристики любой случайной величины. Для нашего примера: выборочное среднее значение равно -0.163 ; среднеквадратичное значение равно 1.013 ; максимальное значение равно 3.048 ; минимальное значение равно -2.901 .

Особое внимание следует обратить на то, что в системе MathCAD помимо встроенной функции `stdev` имеется еще функция `Stdev`, которая предназначена для оценки среднеквадратичного значения малых выборок ($N < 30$). Как видно, отличие заключается только в регистре первой буквы, о чем нужно помнить при написании программ в MathCAD.

Прием №6. Построение гистограмм.

Гистограммой называется график, аппроксимирующий по случайным данным плотность их распределения. При построении гистограммы область значений случайной величины (a, b) разбивается на некоторое количество l сегментов, а затем подсчитывается процент попадания данных в каждый сегмент.

При построении гистограмм важным вопросом является выбор количества сегментов построения или интервалов разбиения. Количество интервалов оказывает влияние на форму эмпирической кривой распределения, которая представляется графически, на объем вычислительных работ, на выбор теоретического закона распределения, а также на результаты оценки согласия по статистическим критериям. При большом числе интервалов эмпирическая кривая может оказаться многовершинной, иметь нехарактерные для нее случайные колебания. При малом числе интервалов могут быть потеряны характерные особенности распределения. Следовательно, количество интервалов надо выбирать таким, чтобы оно способствовало выявлению основных черт распределения и сглаживанию случайных колебаний.

Рекомендации относительно выбора количества интервалов весьма различны. Например, в [4] оптимальное количество интервалов l выбирается по правилу Старджесса:

$$l = 1 + 3.3 \cdot \lg N, \text{ если } N \leq 100;$$

$$l = 5 \cdot \lg N, \text{ если } N > 100,$$

где N – количество наблюдений (объем выборки).

Для построения гистограмм в MathCAD 2001 имеется несколько встроенных функций. Если нет необходимости задавать сегменты гистограммы разной ширины, то удобнее воспользоваться функцией `histogram`:

$$\text{histogram}(l, x),$$

где l – количество сегментов построения гистограммы; x – вектор случайных данных.

Функция `histogram` формирует матрицу гистограммы размера $l \times 2$, состоящую из столбца сегментов разбиения и столбца частоты попадания в них данных. Пример использования функции `histogram` приведен в нижеследующем листинге и на рисунке 5.

В первой строке листинга происходит присвоение значений двум переменным: количество случайных величин $N = 1000$; количество интервалов разбиения вычисляется по правилу Старджесса. В общем случае для округления результата количества интервалов применяется встроенная в MathCAD функция `round(x, y)`. Здесь x – это число, подлежащее округлению; y – количество цифр, оставляемых после десятичной точки.

Во второй строке листинга формируется вектор x значений случайной величины, распределенной по нормальному закону. Как следует из листинга, нормально распределенные случайные величины имеют математическое ожидание равное нулю и среднеквадратичное отклонение равное единицы. Подробнее применение функции `norm` рассматривалось в приеме №1.

```
N := 1000  l := round(5*log(N),0)  l = 15
```

```
x := norm(N,0,1)  f := histogram(l,x)
```

$f =$

	0	1
0	-3.733	0
1	-3.2	2
2	-2.667	11
3	-2.133	18
4	-1.6	61
5	-1.067	135
6	-0.533	197
7	0	208
8	0.533	182
9	1.067	106
10	1.6	57
11	2.133	16
12	2.667	5
13	3.2	2
14	3.733	0

Вторая строка листинга показывает формирование матрицы гистограммы f с помощью встроенной функции `histogram`. Внешний вид матрицы f размером 10×2 представлен в третьей строке листинга.

Для того чтобы создать график в виде гистограммы (рисунок 5), следует выполнить следующие действия:

1. Построить двумерный график, задать переменные по осям – ось абсцисс $f^{<0>}$; ось ординат $f^{<1>}$. Напомним, что угловые скобки в верхнем регистре – это выделение столбца из матрицы. Вводится этот символ сочетанием клавиш `<Ctrl> + <6>`. Таким образом, по оси абсцисс будут отложены средние значения каждого интервала разбиения (числовые значения первого столбца),

а по оси ординат будут отложены частоты появления случайной величины в каждом интервале (числовые значения второго столбца).

2. Двойным щелчком мыши вызвать диалоговое окно **Formatting Currently Selected X-Y Plot** и перейти на вкладку **Traces**.

3. Установить для серии данных гистограммы в поле **Type** элемент списка **solidbar** (гистограмма).

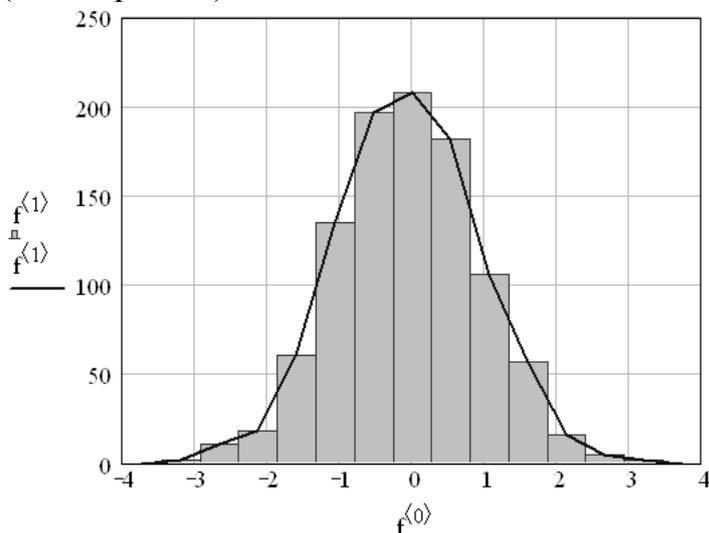


Рисунок 5 – Гистограмма плотности распределения нормальной случайной величины

Для удобства восприятия на рисунке 5 приведена также ломаная кривая, соединяющая значения гистограммы в каждом из интервалов разбиения. Сделать это можно в той же системе координат способом, традиционным для построения обычного двумерного графика.

Прием №7. Некоторые операции с векторами и матрицами в MathCAD.

Простейшие операции матричной алгебры реализованы в MathCAD в виде операторов. Написание операторов по смыслу максимально приближено к их математическому действию. Каждый оператор выражается соответствующим символом. Рассмотрим некоторые матричные и векторные операции, необходимые для выполнения лабораторного практикума. Векторы являются частным случаем матриц размерности $N \times 1$, поэтому для них справедливы все те операции, что и для матриц, если ограничения особо не оговорены. Какие-то действия допустимы только для векторов (например, скалярное произведение). Непосредственное проведение векторных операций над строками, т.е. матрицами $1 \times N$, невозможно; для того чтобы превратить строку в вектор, ее нужно предварительно транспонировать.

Транспонирование. Транспонированием называют операцию, переводящую матрицу размерности $M \times N$ в матрицу размерности $N \times M$, делая столбцы исходной матрицы строками, а строки – столбцами. Пример приведен в нижеследующем листинге. Ввод символа транспонирования T осуществляет-

ся с помощью панели инструментов **Matrix** (Матрица) или нажатием клавиш <Ctrl> + <!>.

$$A := (1 \ 2 \ 3) \quad A^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \quad B^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$$

Сложение матрицы со скаляром. MathCAD поддерживает операцию сложения матрицы со скаляром (нижеследующий листинг). Каждый элемент результирующей матрицы равен сумме соответствующего элемента исходной матрицы и скалярной величины.

$$A := (1 \ 2 \ 3) \quad B := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$

$$x := 1$$

$$A + x = (2 \ 3 \ 4) \quad B + x = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$$

Умножение матриц. При умножении следует помнить, что матрицу размерности $M \times N$ допустимо умножать только на матрицу размерности $N \times P$ (P может быть любым). В результате получается матрица размерности $M \times P$. Чтобы ввести символ умножения, проще всего нажать клавишу со звездочкой <*>. Умножение матриц обозначается по умолчанию точкой, как показано в нижеследующем листинге. Символ умножения матриц можно выбирать точно так же, как и в скалярных выражениях.

$$A := (3 \ 4) \quad B := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot B = (11)$$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 6 & 8 \end{pmatrix}$$

$$C := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \quad D := \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -3 \\ 0 & -4 \end{pmatrix}$$

$$C \cdot D = \begin{pmatrix} 1 & -19 \\ 4 & -43 \end{pmatrix}$$

$$D \cdot C = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -12 & -15 & -18 \\ -16 & -20 & -24 \end{pmatrix}$$

Попытка перемножить в MathCAD две матрицы несоответствующего размера окажется безрезультатной: после введенного знака равенства будет находиться пустой местозаполнитель, а само выражение в редакторе MathCAD выделится красным цветом. При установке курсора на это выражение появится сообщение о несовпадении числа строк первой матрицы числу столбцов второй матрицы.

Заметим, что в отличие от операции умножения над скалярными величинами умножение матриц не обладает свойством коммутативности (перестановочности). В этом легко убедиться, если сравнить результат умножения матриц $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ и $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$, а также $\mathbf{C} \cdot \mathbf{D}$ и $\mathbf{D} \cdot \mathbf{C}$.

Умножение матрицы на скаляр. Аналогично сложению матриц со скаляром определяется умножение и деление матрицы на скалярную величину (нижеследующий листинг). Символ умножения вводится так же, как и в случае умножения двух матриц. На скаляр можно умножать любую матрицу $M \times N$.

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} \cdot 2 = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 8 & 10 & 12 \end{pmatrix} \quad \frac{\mathbf{A}}{2} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 1.5 \\ 2 & 2.5 & 3 \end{pmatrix}$$

Сумма элементов вектора. Иногда бывает нужно вычислить сумму всех элементов вектора. Для этого существует вспомогательный оператор (нижеследующий листинг), задаваемый кнопкой Σv **Vector Sum** (Сумма вектора) на панели **Matrix** или сочетанием клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle 4 \rangle$. Этот оператор чаще оказывается полезным не в векторной алгебре, а при организации циклов с индексированными переменными.

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \Sigma \mathbf{A} = 6$$

Прочие операции над элементами вектора. Пользователь имеет возможность в системе MathCAD определять собственные операции над элементами векторов. Для этого необязательно обращаться к каждому из соответствующих элементов вектора по индексу, как это принято в массивах данных. Достаточно в векторном виде сразу определить необходимое действие. В нижеследующем листинге в качестве примера показаны четыре действия над парой векторов \mathbf{A} и \mathbf{B} : сумма квадратов, разность квадратов, квадрат суммы и квадрат разности элементов векторов.

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} := \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2 = \begin{pmatrix} 17 \\ 29 \\ 45 \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}^2 - \mathbf{B}^2 = \begin{pmatrix} -15 \\ -21 \\ -27 \end{pmatrix}$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})^2 = \begin{pmatrix} 25 \\ 49 \\ 81 \end{pmatrix} \quad (\mathbf{A} - \mathbf{B})^2 = \begin{pmatrix} 9 \\ 9 \\ 9 \end{pmatrix}$$

Очевидно, что подобные пользовательские операции возможны только в случае одинакового количества элементов в каждом векторе.

ТИПОВЫЕ ПРИЕМЫ РАБОТЫ В MICROCAP, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАДАНИЙ

В предыдущем разделе в приеме №3 рассматривалась схема простейшего интегратора, выполненного на операционном усилителе (рисунок 2). Чтобы сохранить преемственность, на основе этой же схемы покажем основные приемы работы в программе схемотехнического моделирования MicroCAP.

Прием №1. Моделирование частотных характеристик электрических схем. Электрическая схема интегратора, изображенная в графическом редакторе программы MicroCAP, представлена на рисунке 6. Из сравнения рисунков 2 и 6 нетрудно заметить, что схема, предназначенная для моделирования в MicroCAP, дополнена источником сигнала $V1$, сопротивлением нагрузки Rn и двуполярным источником питания $V2-V3 \pm 15V$. Операционный усилитель – пятиполюсный, с выводами для подключения питающего напряжения.

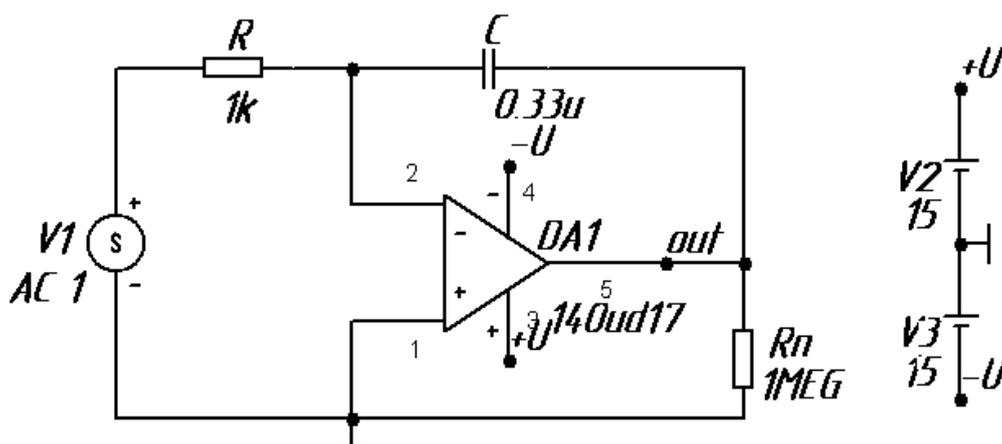


Рисунок 6 – Схема интегратора на операционном усилителе

Графические образы общего проводника, резистора, конденсатора и источника постоянного напряжения проще всего нанести на поле чертежа нажатием на пиктограммы \perp \sim $\text{—}|$ $\text{—}|$ на панели инструментов. В появляющихся затем диалоговых окнах свойств ЭРЭ в строке ввода **Value** (Значение) указывают номинальное значение параметра. Для символа общего проводника указание свойств не требуется. В обозначениях номиналов ЭРЭ рекомендуется использовать специальные суффиксы для дольных и кратных единиц измерения (см. Приложение 3). Для размещения на поле чертежа универсального источника напряжения $V1$ выполняется команда *Component/Analog Primitives/Waveform Sources/V*. В диалоговом окне свойств источника в строке ввода **Value** указывают **AC 1** (амплитуда напряжения при анализе по переменному току 1В).

В схеме использован операционный усилитель K140УД17. Описание математической модели ОУ находится во внешнем файле `mu_oramp.lib`, ко-

торый не входит в стандартную поставку программы MicroCAP 7. Поэтому для подключения модели ОУ необходимо:

1. Убедиться, что файл `my_opamp.lib` находится в папке `MC7\LIBRARY`.
2. Закрывать программу MicroCAP 7.
3. Найти в папке `MC7\LIBRARY` текстовый файл `nom.lib` и дописать в нем строку **.lib "my_opamp.lib"**.
4. Сохранить изменения в файле `nom.lib` и запустить заново программу MicroCAP 7.

Подключение новой математической модели достаточно произвести только один раз, при последующих запусках такая модель будет всегда доступна. Нанесение графического образа ОУ с пятью полюсами происходит по команде *Component/Analog Primitives/Subckt/Opamp_Subckt_5*. В появившемся диалоговом окне свойств ОУ в строке **NAME** указывают название **140UD17** (такое название ОУ содержится в описании его математической модели в файле `my_opamp.lib`). Символы **UD** обязательно должны буквами латинского алфавита. После размещения графического образа ОУ следует извлечь из библиотеки `my_opamp.lib` описание математической модели и перенести его в рабочий файл. Делается это по команде *Edit/Refresh Models...* В результате ОУ, находящийся на поле чертежа, будет основан на извлеченной математической модели. В связи с тем, что процесс извлечения математической модели и ее ассоциирование с графическим образом ЭРЭ происходит автоматически, крайне важно контролировать успешность этого процесса. Признаки правильного подключения математической модели ОУ можно увидеть в диалоговом окне свойств этого ЭРЭ (рисунок 7). В средней части диалогового окна располагается ранее введенное нами имя модели **NAME = 140UD17**. Кроме этого, в нижней части диалогового окна присутствует описание математической модели ОУ на входном языке SPICE, извлеченное из файла библиотеки `my_opamp.lib`. Окно просмотра описания снабжено вертикальной полосой прокрутки.

В случае неправильного подключения математической модели в окне просмотра диалогового окна будет лишь две строки (начало и конец описания модели):

```
.SUBCKT 140UD17 1 2 3 4 5  
.ENDS 140UD17
```

При изображении схемы на рисунке 6 использован способ скрытого представления цепей питания ОУ. Иначе говоря, на схеме контакты питания ОУ и источника напряжения визуально не связаны между собой. Способ скрытого представления электрических цепей предполагает присвоение соответствующим отводам от контактов ЭРЭ уникальных имен: например, **-U**, **+U**. Отвод представляет собой короткий отрезок проводника. Присвоение имени происходит двойным щелчком мыши на отводе. В появившемся диалоговом окне указывается новое имя цепи. Способ скрытого изображения про-

водников позволяет упростить чтение и понимание электрической схемы за счет визуального отсутствия некоторых, имеющих второстепенное значение, электрических проводников. Заметим, что программа MicroCAP воспринимает разные участки электрических проводников, имеющих одно и то же уникальное имя, как единую глобальную электрическую цепь.

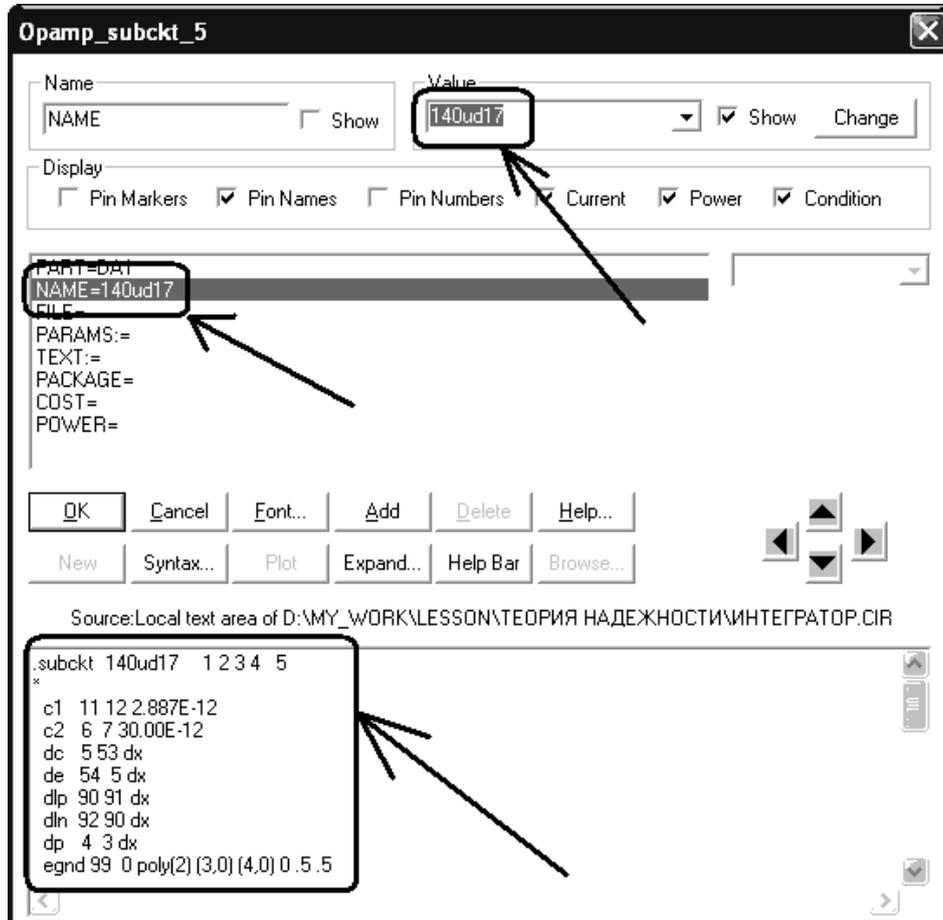


Рисунок 7 – Признаки правильного подключения модели операционного усилителя

Напомним, что по умолчанию программа MicroCAP присваивает в произвольном порядке номера для всех контрольных точек на схеме. Однако полезно давать уникальные (осмысленные) имена тем контрольным точкам на схеме, в которых предполагается наблюдать сигнал. Обычно это контрольные точки, относящиеся ко входу или выходу схемы. Так, на рисунке 6, выходной зажим электрической схемы обозначен как **out**. Осмысленные названия контрольных точек позволяют, с мнемонической точки зрения, проще записывать выражения в диалоговых окнах задания параметров моделирования. Например, **V(out)** – напряжение на выходе интегратора – выглядит и записывается понятней, чем выражение **V(3)**, хотя речь идет об одной и той же контрольной точке. Символы русского алфавита в названиях контрольных точек недопустимы. Процесс именования контрольных точек полностью аналогичен именованию отводов для прокладки скрытых цепей.

Моделирование в частотной области проводится по команде *Analysis/AC...* В появляющемся диалоговом окне **AC Analysis Limits** (Параметры моделирования в частотной области) указывают:

- в строке ввода **Frequency Range** (Диапазон частот) **10k,1** – по правилам программы MicroCAP 7 сначала идет максимальное, а затем минимальное значения диапазона;

- в строке **Number of Points** (Количество расчетных точек) **100** - количество точек по частоте, в которых производится расчет частотных характеристик;

- в столбце **P** первой строки **1** – первый и единственный номер окна графика;

- в столбце **X Expression** (Выражение по X) **F** – резервированная переменная – частота;

- в столбце **Y Expression** (Выражение по Y) **db(v(out))** – значение выходного напряжения в децибелах. Функция db является стандартной функцией работы с комплексными числами в MicroCAP 7 (см. Приложение 3).

Кроме этого в диалоговом окне **AC Analysis Limits** в выпадающем списке **Frequency Step** (Шаг по частоте) выбирают значение **Log** (логарифмический); опцию **Auto Scale Range** (Автоматическое масштабирование) рекомендуется включить.

Для правильного представления на экране графика ЛАЧХ необходимо убедиться, что внешний вид первых двух графических кнопок слева от столбца **P** таков: . Графический вид этих кнопок обозначает, что ось абсцисс будет представлена в логарифмическом, а ось ординат – в линейном масштабе. Нажатие на кнопку **Run** в диалоговом окне приводит к построению логарифмической амплитудно-частотной характеристики интегратора (рисунок 8).

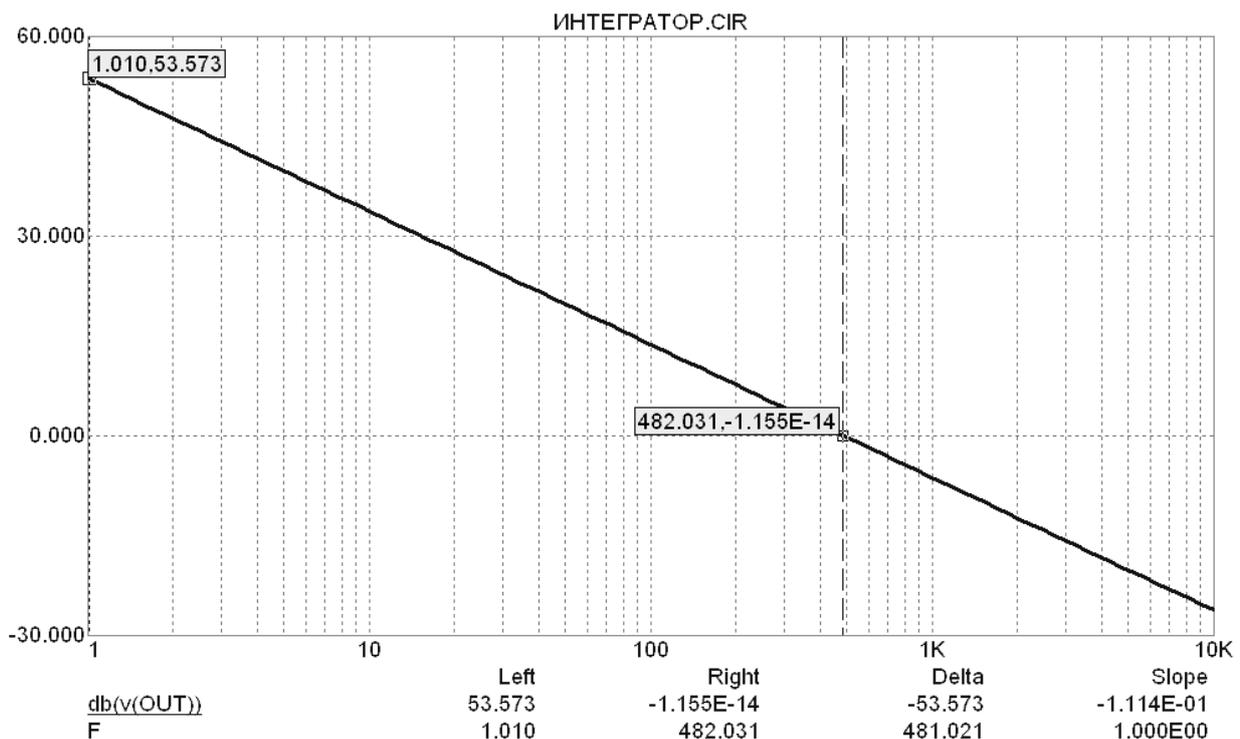


Рисунок 8 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Прием №2. Моделирование статистического разброса параметров ЭРЭ в электрических схемах. В программе MicroCAP указания на разброс параметров какого-либо ЭРЭ осуществляется в описании его математической модели [2]. Вообще статистический разброс параметров ЭРЭ необходим для проведения многовариантного анализа по методу Монте-Карло. Более подробно о методе Монте-Карло говорится в описании к лабораторной работе №1. Статистический анализ по методу Монте-Карло в программе MicroCAP имеет три разновидности – по количеству законов распределения случайных величин, которые определяются в соответствующем диалоговом окне (рисунок 9) **Monte Carlo Options** (Параметры моделирования по Монте-Карло):

1. равномерное распределение (Uniform);
2. нормальное распределение (Gauss);
3. распределение для граничных испытаний (Worst Case).

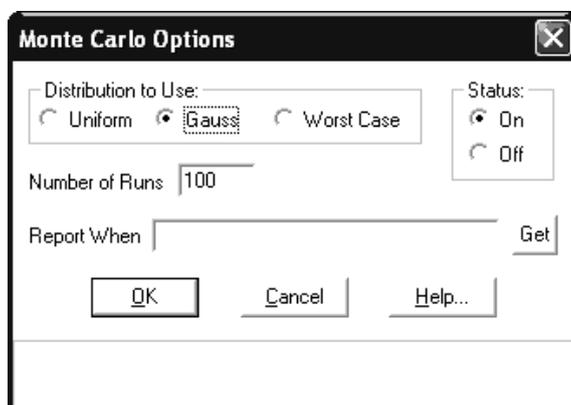


Рисунок 9 – Диалоговое окно свойств моделирования по методу Монте-Карло

Если необходимо задать разные законы распределения параметров для ЭРЭ, входящих в одну и ту же электрическую схему, то применяют специальные ключевые слова (о чем будет сказано ниже) непосредственно в описании математической модели таких ЭРЭ.

Статистический анализ с использованием перечисленных трех законов распределения случайных величин предполагает, что в описании математической модели ЭРЭ должно быть ключевое слово *LOT* и, как минимум, числовое значение погрешности параметра. Существует более сложный механизм указания погрешности параметров с помощью ключевых слов *LOT* и *DEV*. Его смысл заключается в том, что ключевое слово *LOT* задает погрешность «первого порядка», т.е. относительно номинального значения параметра. Ключевое слово *DEV* задает погрешность «второго порядка» – уже относительно случайного значения, принятого первоначально по слову *LOT*. Одинокое использование ключевого слова *DEV* в описании модели аналогично применению слова *LOT*.

Общий вид записи статистического разброса какого-либо параметра можно представить как:

$$[LOT[/<lot\#\>][/<distribution\ name\>]=<\delta\>[\%]]$$

$$[DEV[/<lot\#\>][/<distribution\ name\>]=<\delta\>[\%]]$$

где *lot#* – номер генератора случайных чисел от 0 до 9; *distribution name* - закон распределения случайной величины; δ – числовое значение погрешности параметра; % - необязательный символ процента, если он отсутствует, то программа воспринимает числовое значение как абсолютную погрешность, в противном случае – как относительную.

Приведенный общий вид записи требует некоторых пояснений. Выражения, находящиеся в квадратных скобках, являются необязательными. Выражения в угловых скобках представляют собой числовые или символьные константы. Одинаковый номер *lot#* генератора случайных чисел в разных описаниях математических моделей позволяет моделировать коррелированные случайные величины. В случае отсутствия номера генератора случайные величины будут безусловно некоррелированными между собой. Закон распределения *distribution name* задается с помощью ключевых слов *GAUSS* (нормальное), *UNIFORM* (равномерное) или *WCASE* (граничные испытания). Приоритет закона распределения, указанного в описании математической модели ЭРЭ, выше, чем указание закона распределения в диалоговом окне свойств **Monte Carlo Options** (рисунок 9). В случае отсутствия ключевых слов в описании модели информация о законе распределения берется из диалогового окна **Monte Carlo Options**.

Для равномерного закона и закона граничных испытаний числовое значение δ погрешности параметра интерпретируется просто. Величина погрешности, переведенная или сразу заданная в абсолютной форме, есть половина диапазона, которое может принять случайная величина. При этом по закону граничных испытаний возможны только два предельных (*Min* и *Max*) значения случайных величин:

$$Min = M_X - \delta;$$

$$Max = M_X + \delta,$$

где M_X – математическое ожидание параметра, оно же номинальное значение.

Закон равномерного распределения предполагает, что случайные значения величины будут с одинаковой плотностью располагаться внутри диапазона $[M_X - \delta; M_X + \delta]$.

Для случая нормального распределения значение погрешности δ , заданное в описании модели, нельзя трактовать как меру среднеквадратического отклонения σ_X . Эти величины находятся в более сложной функциональной зависимости:

$$\sigma_x = \frac{\delta\%}{100\%} \cdot \frac{M_x}{\sigma_D},$$

где σ_D – стандартная мера отклонения случайной величины при заданном уровне доверительной вероятности p . Например, если $p = 99.7\%$, то $\sigma_D = 3$.

Проиллюстрируем задание статистического разброса параметров ЭРЭ на нескольких простых примерах.

Пример 1.

.MODEL N1 NPN(BF=300 LOT=10%)

Пример демонстрирует, как можно для модели *n-p-n* транзистора *N1* задать 10% погрешность для коэффициента передачи тока *BF*. Закон распределения при этом будет взят из диалогового окна **Monte Carlo Options**.

Пример 2.

.MODEL N2 NPN(BF=300 DEV=1%)

Пример демонстрирует задание 1% погрешности для коэффициента передачи тока *BF* в рамках закона распределения, указанного в диалоговом окне **Monte Carlo Options**. В данном случае ключевое слово *DEV* по своему действию полностью аналогично слову *LOT*.

Пример 3.

.MODEL N3 NPN(BF=300 LOT=10% DEV=1%)

Предположим для этого примера, что в диалоговом окне **Monte Carlo Options** (рисунок 9) выбран закон распределения для граничных испытаний **Worst Case**. Сначала будут вычислены два предельных 10% отклонения «первого порядка» для параметра *BF*:

$$BF1 = 300 - 300 \cdot 0.1 = 270;$$

$$BF2 = 300 + 300 \cdot 0.1 = 330.$$

Затем будут вычислены четыре предельных 1% отклонения «второго порядка» относительно величин *BF1* и *BF2*:

$$BF11 = 270 - 300 \cdot 0.01 = 267;$$

$$BF12 = 270 + 300 \cdot 0.01 = 273;$$

$$BF21 = 330 - 300 \cdot 0.01 = 327;$$

$$BF22 = 330 + 300 \cdot 0.01 = 333.$$

Последующее моделирование по методу Монте-Карло будет оперировать со случайными значениями величины *BF* из множества {267, 273, 327, 333}.

Пример 4.

.MODEL RMOD RES(R=1 LOT=10% DEV=1%)

Резисторы, конденсаторы и индуктивности должны быть основаны на математических моделях, в которых погрешность приведена к соответствующему масштабному множителю *R*, *C* или *L*. Этот пример демонстрирует задание 10% погрешности «первого порядка» для масштабного коэффициента *R* сопротивления резистора и 1% погрешность «второго порядка». Закон распределения случайной величины будет зависеть от информации, указанной в диалоговом окне **Monte Carlo Options**.

Пример 5.

.MODEL N1 NPN(RE=1 LOT=10%)

.MODEL N2 NPN(RE=2 LOT=10%)

В этом примере объемные сопротивления эмиттера RE для $n-p-n$ транзисторов $N1$ и $N2$ являются некоррелированными случайными величинами. Объемные сопротивления имеют 10% погрешность своего числового значения и во время моделирования по методу Монте-Карло эти параметры принимают случайные, независимые друг от друга, величины. Закон распределения случайной величины будет зависеть от информации, указанной в диалоговом окне **Monte Carlo Options**.

Пример 6.

.MODEL N1 NPN(RE=1 LOT/1=10%)

.MODEL N2 NPN(RE=2 LOT/1=10%)

Пример 6 демонстрирует механизм задания коррелированных случайных величин. В частности, после ключевого слова LOT для двух различных моделей транзисторов $N1$ и $N2$ указан одинаковый номер генератора случайных чисел. При моделировании по Монте-Карло это приведет к тому, что погрешности, заданные словом LOT будут одинаковыми, а случайные величины RE – коррелированными между собой. Закон распределения случайной величины будет зависеть от информации, указанной в диалоговом окне **Monte Carlo Options**.

Пример 7.

.MODEL N1 NPN(RE=1 LOT/1/UNIFORM=10% DEV/2=1%)

.MODEL N2 NPN(RE=2 LOT/1/UNIFORM=10% DEV/3=1%)

В этом примере объемное сопротивление эмиттера RE для транзисторов $N1$ и $N2$ имеет погрешности «первого» и «второго порядков». Погрешность «первого порядка», заданная словом LOT , представляет собой коррелированную случайную величину, подчиняющуюся равномерному закону распределения. Здесь закон распределения задан в явном виде с помощью ключевого слова $UNIFORM$. Погрешность «второго порядка», указанная словом DEV имеет некоррелированный случайный характер, поскольку в явном виде заданы различные номера генераторов случайных чисел. Для погрешности «второго порядка» закон распределения случайной величины будет зависеть от информации, указанной в диалоговом окне **Monte Carlo Options**. При моделировании по Монте-Карло параметры RE будут иметь коррелированную случайную «основу», на которую затем нанесена некоррелированная случайная «оболочка».

От рассмотрения небольших частных примеров вернемся к рассмотрению электрической схемы интегратора, представленной на рисунке 6. Предположим, что в схеме интегратора имеет место 10% статистический разброс номинальных значений сопротивления и емкости у элементов R и C , соответственно. Разброс значений подчинен нормальному закону распределения, при этом случайные величины имеют некоррелированный характер. Поскольку резистор R и конденсатор C образуют частотно-зависимую цепь интегратора, то случайные значения их сопротивления и емкости приведут к случайным значениям полосы пропускания и максимального коэффициента передачи

всего устройства. Требуется получить семейство ЛАЧХ интегратора для 100 вариантов случайных значений параметров R и C .

Сначала нужно задать математические модели для элементов R и C с указанием величины погрешности. Делается это в три этапа:

1. В диалоговых окнах свойств элементов R и C в списке атрибутов необходимо выбрать строку **MODEL**. Для элементов типа R , C , L имя математической модели, как правило, изначально отсутствует.

2. В строке ввода **Value** вводим уникальное (неповторяющееся) имя математической модели для элементов R и C . Пусть модель резистора имеет имя RMOD, а модель конденсатора – CMOD.

3. После указания имен математических моделей выполняется команда *Edit/Refresh Models...* Эта команда проводит «стыковку» графических образов ЭРЭ с соответствующими математическими моделями.

Результат применения этой команды можно увидеть на вкладке **Text** основного окна программы MicroCAP. При условии правильного выполнения предыдущих действий на вкладке **Text** появятся заготовки для описания математических моделей элементов R и C :

**.MODEL RMOD RES()
.MODEL CMOD CAP()**

Здесь .MODEL – директива программы MicroCAP; RES и CAP – резервированные слова, которые помогают распознать программе тип ЭРЭ. В скобках пользователь должен самостоятельно перечислить параметры и их числовые значения.

Команда *Edit/Refresh Models...* перенесет также из внешних файлов библиотек описания тех ЭРЭ, которые базируются на математических моделях. Поэтому в данном примере на вкладке **Text** будет также присутствовать описание модели операционного усилителя 140UD17.

Текстовые заготовки для элементов R и C , указанные выше, редактируются вручную. Цель редактирования – записать масштабный коэффициент и приведенное к нему значение погрешности. Для записи числового значения погрешности воспользуемся ключевым словом *LOT*; погрешность представим в относительном виде:

**.MODEL RMOD RES(R=1 LOT=10%)
.MODEL CMOD CAP(C=1 LOT=10%)**

Перед началом анализа по методу Монте-Карло задается доверительная вероятность статистических оценок. Для нормального закона распределения известно [5], что чем больше доверительная вероятность p , тем больше стандартная мера отклонения σ_D случайной величины. Такую зависимость удобно представлять в табулированном виде (таблица 1).

Пусть в данном примере $\sigma_D = 3$ при $p = 99.7\%$. В программе MicroCAP стандартная мера отклонения – это один параметров глобальных настроек. Для его установки выполняется команда *Options/Global Settings*, и в диалоговом окне глобальных настроек **Global Settings** в строке **SD** указывают значе-

ние 3. Следует помнить, что любой глобальный параметр программы впоследствии будет применяться не только к текущему проекту, но и ко всем последующим и предыдущим проектам.

Таблица 1 - Зависимость стандартной меры отклонения σ_D от доверительной вероятности P

σ_D	P
1.0	68.0%
1.96	95.0%
2.0	95.5%
2.58	99.0%
3.0	99.7%
3.29	99.9%

Предварительное моделирование, выполненное по команде *Analysis/AC...*, ничем не отличается от обычного анализа в частотной области. Подробности проведения такого моделирования были рассмотрены в приеме №1 настоящего раздела. Результатом моделирования будет являться ЛАЧХ интегратора (см. рисунок 8), соответствующая номинальным значениям сопротивления (1 кОм) и емкости (0.33 мкФ) элементов R и C .

Не закрывая окно с полученным графиком, следует выполнить команду *Monte Carlo/Options* (в других режимах пункт меню *Monte Carlo* недоступен). В появившемся диалоговом окне **Monte Carlo Options** (см. рисунок 9) в группе **Distribution to Use** (Закон распределения) выбирают значение **Gauss** (Нормальный). В группе **Status** (Состояние) выбирают значение **On** (Включено). В строке ввода **Number of Runs** (Число реализаций) указывают **100**. Работа с диалоговым окном завершается нажатием на кнопку **ОК**.

Далее нажатием на пиктограмму  на панели инструментов производится запуск моделирования по методу Монте-Карло. В результате будет получено семейство из 100 ЛАЧХ интегратора, соответствующее различным случайным значениям R и C , распределенным по нормальному закону в пределах 10% погрешности (рисунок 10).

Прием №3. Построение гистограмм на основе целевых функций. Общим недостатком графиков с семействами каких-либо характеристик, полученных по методу Монте-Карло, является низкая информативность. Действительно, если обратить внимание на рисунок 10, как результат моделирования статистического разброса параметров в схеме интегратора, то можно прийти к следующему заключению.

Все характеристики семейства расположены очень плотно. Это не позволяет визуально заметить особенности того или иного закона распределения. Кроме того, отсутствует информация о важнейших числовых характеристиках закона распределения. По этим причинам график с семейством характеристик при анализе по Монте-Карло, как правило, преобразуют в иной гра-

фический вид – гистограмму распределения статистических данных (см. прием №6 предыдущего раздела). Перед построением гистограммы исследователь должен четко определить, какой выходной параметр электрической схемы будет представлен, а также его способ выделения из семейства характеристик.

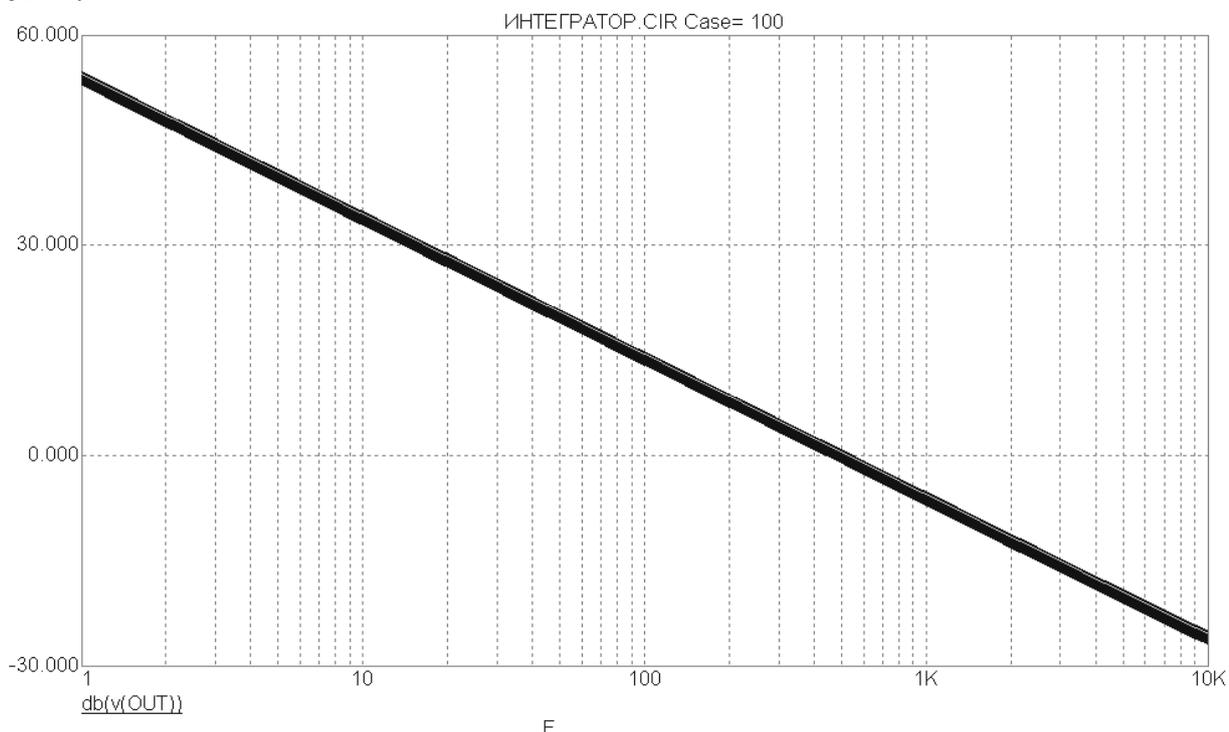


Рисунок 10 – Семейство ЛАЧХ интегратора

Вообще программа MicroCAP обладает широкими функциональными возможностями по выделению и представлению интересующего параметра. В англоязычном оригинале такой механизм назван разработчиками программы как Performance Analysis и Performance Function. В русскоязычной литературе устоявшегося термина, наиболее точно отражающего суть, пока не существует. Например, в многочисленных работах Разевига В.Д. по компьютерному моделированию введены понятия «целевой анализ» и «целевая функция». Заметим, что с точки зрения линейного программирования это не совсем корректно, поскольку при работе в MicroCAP в большинстве случаев задача оптимизации не ставится. Однако, несмотря на некорректность, здесь и далее будем использовать терминологию Разевига В.Д. Применительно к программе MicroCAP целевая функция – это график, на котором извлеченный из семейства характеристик параметр представлен в явном виде (как функция) в новой системе координат.

Для упрощения работы по составлению целевых функций в программе MicroCAP существует большое количество шаблонов. Шаблоны целевых функций представлены в Приложении 4. С их помощью в полуавтоматическом режиме можно составить практически любую пользовательскую целевую функцию; при этом допускается вложение шаблонов друг в друга.

Предположим, что на основе выполненного моделирования по методу Монте-Карло для схемы интегратора (рисунок 6) требуется построить гистограмму распределения случайной величины для коэффициента передачи на постоянном токе. Анализируя семейство ЛАЧХ на рисунке 10, сначала сфор-

мулируем словесное описание последовательности действий по извлечению требуемого параметра из семейства. Коэффициент передачи на постоянном токе – это максимальный коэффициент передачи интегратора; функция ЛАЧХ в программе MicroCAP ранее обозначена нами как **db(v(out))** (см. прием №1 «Моделирование частотных характеристик электрических схем»). Следовательно, для извлечения требуемого параметра нужно по каждой функции **db(v(out))** семейства характеристик определить ее максимальное значение (максимальное значение y).

Перейдем теперь к составлению целевой функции с помощью встроенных средств программы MicroCAP. Дальнейшие действия предполагают, что на экране компьютера уже находится семейство ЛАЧХ интегратора, как на рисунке 10. Если это не так, то необходимо вернуться к выполнению приема №2 и получить указанное семейство. Не закрывая окно с семейством характеристик, следует выполнить команду *Monte Carlo/Histograms/Add Histograms...* Это приводит к появлению диалогового окна **Properties** (Свойства), представленного на рисунке 11, сверху. На вкладке **Plot** (График) задаются основные установки для будущего графика целевой функции. По умолчанию в строке ввода **What to Plot** (Что построить), как правило, уже присутствует шаблон целевой функции **Rise_Time** (Время нарастания). Поскольку наш пример связан с использованием другой целевой функции, строку ввода нужно обязательно очистить – она должна быть пустой.

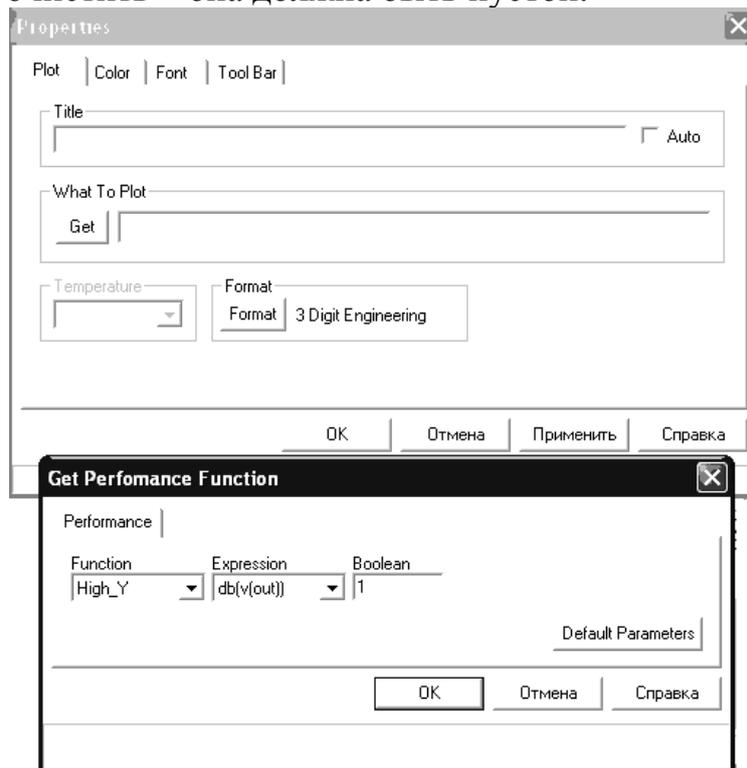


Рисунок 11 – Диалоговые окна для составления целевых функций

Требуемый шаблон целевой функции вводится нажатием на кнопку **Get** (Получить), при этом появляется новое диалоговое окно **Get Performance Function** (Получение целевой функции), изображенное на рисунке 11, снизу. В выпадающем списке **Function** (Функция) представлены шаблоны всех целевых функций. После выбора нужного шаблона справа от списка **Function**

появляются строки ввода для задания прочих установок, их набор зависит от выбранного шаблона.

Словесному описанию последовательности действий по составлению целевой функции, сформулированному выше, наиболее подходит шаблон **High_Y** из списка **Function**. Этот шаблон находит ординату точки глобального максимума на каждой характеристике семейства. После выбора шаблона в диалоговом окне **Get Performance Function** в строке **Expression** (Выражение) автоматически появится обозначение функции ЛАЧХ **db(v(out))**, на основе которой проводится целевой анализ. Установка **Boolean** (Логика) – логическая переменная, разрешающая (**1**) или запрещающая (**0**) построение целевой функции. Если определить все установки и закрыть нажатием на кнопку **OK** диалоговое окно **Get Performance Function**, то в диалоговом окне **Properties** в строке **What to Plot** будем иметь окончательный вид искомой целевой функции:

$$\text{High_Y}(\text{db}(v(\text{OUT})),1)$$

Работа с диалоговым окном **Properties** завершается нажатием на кнопку **OK**. При этом на экране автоматически появится гистограмма распределения случайной величины – коэффициента передачи интегратора на постоянном токе (рисунок 12). В правой части окна расположен статистический ряд, представляющий собой максимальный коэффициент передачи интегратора в каждой реализации. В левой нижней части приводятся основные числовые характеристики: наименьшее значение статистического ряда (**Low**); математическое ожидание (**Mean**); наибольшее значение (**High**); среднеквадратичное отклонение (**Sigma**). Правее расположены параметры, которые могут изменяться пользователем: количество интервалов разбиения гистограммы (**Intervals**), минимальное значение статистического ряда (**Low**) и максимальное значение статистического ряда (**High**). Изменением этих трех параметров пользователь может добиться приемлемой формы гистограммы, а также несколько сузить вариационный ряд за счет исключения его крайних значений. Чтобы вновь введенные значения вступили в силу, требуется в качестве подтверждения щелкнуть левой кнопкой мыши на поле гистограммы.

В нашем примере количество интервалов разбиения гистограммы отредактировано вручную. По правилу Старджесса имеем (см. прием № 6 предыдущего раздела):

$$l = 1 + 3.3 \cdot \lg 100 = 7.6 \approx 8.$$

По оси абсцисс гистограммы отложены числовые значения, соответствующие границам интервалов разбиения диапазона случайной величины. По оси ординат отложены абсолютные частоты появления случайной величины. Для удобства восприятия на каждом из сегментов гистограммы нанесено точное числовое значение его высоты, т.е. частоты попадания случайной величины в данный интервал.

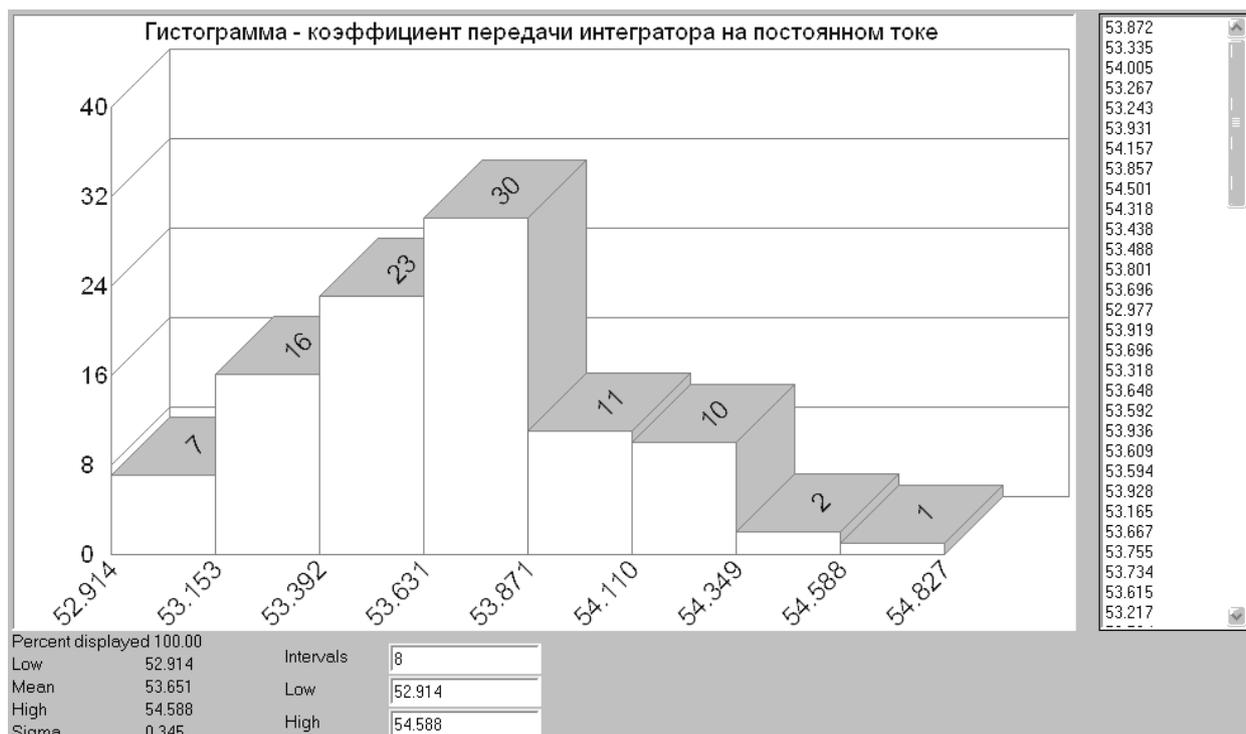


Рисунок 12 – Гистограмма распределения случайной величины - коэффициента передачи интегратора на постоянном токе

Внимание! Воспроизведение примеров, связанных с построением гистограмм распределения случайных величин, приводит к неповторяющимся результатам. При повторных запусках на моделирование таких примеров внешний вид гистограммы и числовые характеристики статистического ряда будут несколько отличаться раз от раза. Причина этого – разные наборы случайных значений, вырабатываемых генератором случайных чисел при каждом запуске.

На основе того же семейства ЛАЧХ интегратора (рисунок 10) зададимся целью построить гистограмму распределения случайной величины для частоты единичного усиления. Сформулируем словесное описание последовательности действий по извлечению требуемого параметра. Частота единичного усиления – это частота, при которой коэффициент передачи устройства $K_U = 1$. Учитывая, что исходное семейство представляет собой логарифмические функции, то частота единичного усиления – это точка пересечения каждой функции $db(v(out))$ с осью X .

Снова выполним команду *Monte Carlo/Histograms/Add Histograms...* В диалоговом окне **Properties** на вкладке **Plot** в списке **Function** выбираем наиболее подходящий шаблон будущей целевой функции – **X_Level**. Шаблон **X_Level**, по определению, служит для нахождения абсциссы точки или точек, где значение функции принимает заранее определенное значение. После выбора шаблона **X_Level** в строке **Expression** автоматически появится обозначение функции ЛАЧХ $db(v(out))$. Установка **Boolean** имеет аналогичный предыдущему примеру смысл. Установка **N** (Номер) указывает порядковый номер пересечения функцией заданного уровня u . Очевидно, что многократ-

ное пересечение функцией заданного уровня y возможно только для немонотонных функций, например, для периодических. Нумерация точек пересечения функции идет слева направо. В нашем случае – $N = 1$. Последняя установка **Y Level** (Уровень y) при определении целевой функции позволяет задать числовое значение для ординаты линии пересечения. Для нашего случая установка **Y Level** должна быть равна **0**, что равносильно нахождению точки пересечения функции с осью абсцисс.

Окончательный вид целевой функции в диалоговом окне **Properties** в строке ввода **What to Plot**:

X_Level(db(v(OUT)),1,1,0)

Результат целевого анализа – гистограмма распределения случайной величины представлена на рисунке 13.

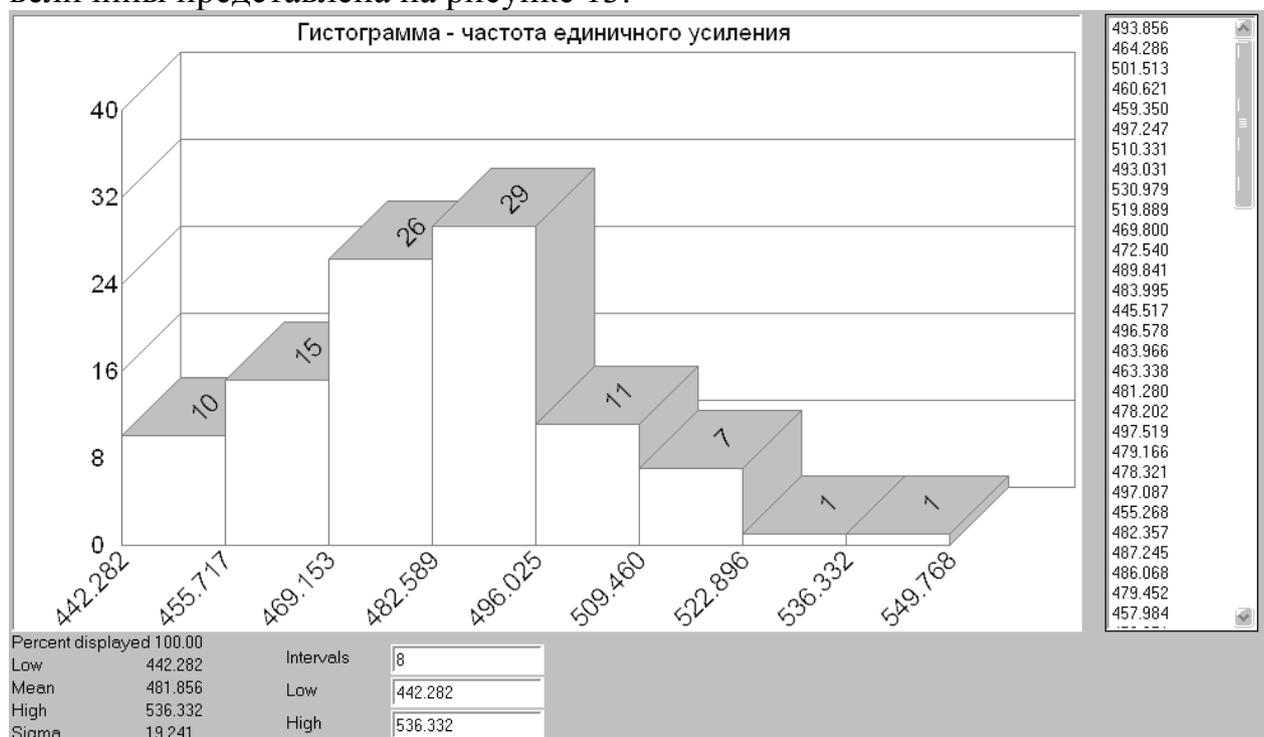


Рисунок 13 – Гистограмма распределения случайной величины – частоты единичного усиления интегратора

Прием №4. Поочередная (вложенная) вариация параметров электрической схемы.

При анализе электрической схемы в режиме по постоянному току, а также в частотной или временной области часто возникает потребность в вариации нескольких параметров такой схемы. Вариация возможна для любого параметра ЭРЭ или его модели. Вообще программа MicroCAP 7 поддерживает одновременную вариацию до 20 параметров.

Рассмотрим наиболее простой частный случай многовариантного анализа – электрическая схема с двумя варьируемыми параметрами X и Y . Пусть параметр X имеет n табулированных значений внутри своего диапазона, а параметр Y имеет m табулированных значений. Тогда последовательность принимаемых параметрами значений можно представить как:

$$X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\};$$

$$Y \in \{y_1, y_2, \dots, y_m\}.$$

Многовариантный анализ с набором табулированных значений параметров X и Y в принципе можно провести по двум комбинационным схемам. Первая комбинационная схема содержит следующие сочетания:

$$x_1 \cup y_1;$$

$$x_2 \cup y_2;$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$x_n \cup y_m, \text{ где } n = m.$$

Такая схема называется одновременное (параллельное) изменение варьируемых параметров. Очевидно, что условие $n = m$ необходимо для образования парных комбинаций.

Вторая комбинационная схема содержит гораздо больше сочетаний:

$$x_1 \cup y_1; \quad x_2 \cup y_1; \quad \dots\dots\dots; \quad x_n \cup y_1;$$

$$x_1 \cup y_2; \quad x_2 \cup y_2; \quad \dots\dots\dots; \quad x_n \cup y_2;$$

$$\dots\dots\dots; \quad \dots\dots\dots; \quad \dots\dots\dots; \quad \dots\dots\dots;$$

$$x_1 \cup y_m; \quad x_2 \cup y_m; \quad \dots\dots\dots; \quad x_n \cup y_m, \text{ где } n \neq m.$$

Приведенная схема называется поочередное (вложенное) изменение варьируемых параметров. Общее количество возможных комбинаций при этом составляет $m \cdot n$; количество табулированных значений для параметров X и Y может быть различным. Аналогичные рассуждения можно провести и для большего количества варьируемых параметров.

Для выполнения последующих заданий лабораторного практикума потребуется применение только второй комбинационной схемы. В связи с этим рассмотрим схему интегратора (рисунок б), в которой номинальные значения сопротивления и емкости элементов R и C подвергаются поочередной (вложенной) вариации.

Сопротивление резистора R принимает значения $\{1 \text{ кОм}, 1.5 \text{ кОм}\}$. Емкость конденсатора C принимает значения $\{0.33 \text{ мкФ}, 0.66 \text{ мкФ}, 0.99 \text{ мкФ}, 1.32 \text{ мкФ}, 1.65 \text{ мкФ}\}$. По второй комбинационной схеме можно реализовать десять сочетаний параметров:

$$1 \text{ кОм} \cup 0.33 \text{ мкФ}; \quad 1.5 \text{ кОм} \cup 0.33 \text{ мкФ};$$

$$1 \text{ кОм} \cup 0.66 \text{ мкФ}; \quad 1.5 \text{ кОм} \cup 0.66 \text{ мкФ};$$

$$1 \text{ кОм} \cup 0.99 \text{ мкФ}; \quad 1.5 \text{ кОм} \cup 0.99 \text{ мкФ};$$

$$1 \text{ кОм} \cup 1.32 \text{ мкФ}; \quad 1.5 \text{ кОм} \cup 1.32 \text{ мкФ};$$

$$1 \text{ кОм} \cup 1.65 \text{ мкФ}; \quad 1.5 \text{ кОм} \cup 1.65 \text{ мкФ}.$$

Задание установок для моделирования в частотной области проводится в два этапа. Первый этап полностью аналогичен последовательности действий, рассмотренной в приеме №1 настоящего раздела. Это работа в диалоговом окне **AC Analysis Limits**. Вторым этапом начинается с нажатия на кнопку **Stepping** (Варьирование) в диалоговом окне **AC Analysis Limits**. Последова-

тельность действий в появившемся диалоговом окне **Stepping** такова (применительно к нашему примеру):

- на вкладке **1** в выпадающем списке **Step What** (Что варьировать) выбирают **R** – позиционное обозначение резистора частотно-задающей цепи;

- в группе **Step It** (Включение варьирования) устанавливают значение **Yes** (Да);

- в группе **Method** (Метод) устанавливают значение **List** (Список) – имеется в виду набор табулированных значений, которые может принимать параметр;

- в группе **Change** (Изменение) устанавливают значение **Step variables in nested loops** (Вариация переменных во вложенных циклах), что соответствует выбору второй комбинационной схемы;

- в появившейся строке **List** перечисляют набор табулированных значений параметра **R**: **1k,1.5k**. Буква **k** – в латинском регистре.

Аналогично поступают со вкладкой **2**, где в списке **Step What** выбирают **C** – позиционное обозначение конденсатора частотно-задающей цепи. В строке ввода **List** перечисляют значения: **0.33u,0.66u,0.99u,1.32u,1.65u**. В строках ввода поддерживаются суффиксы для обозначения кратных и дольных величин.

Работа с диалоговым окном **Stepping** заканчивается нажатием на кнопку **ОК**. Затем нажатием на пиктограмму  на панели инструментов производится запуск на моделирование. Учитывая порядок задания параметров на вкладках **1** и **2**, варьирование сопротивления образует внешний цикл, а варьирование емкости – внутренний. Результат анализа (рисунок 14) представляет собой семейство ЛАЧХ интегратора из 10 сочетаний параметров **R** и **C** по второй комбинационной схеме.

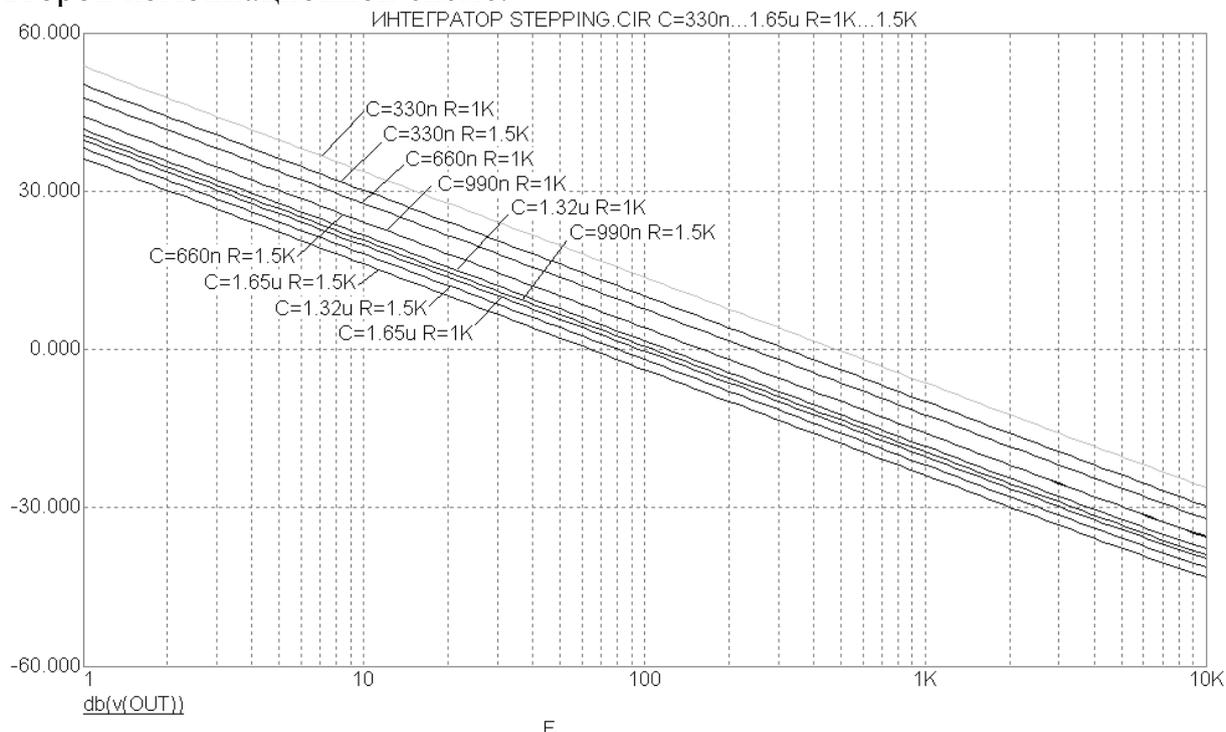


Рисунок 14 – Семейство ЛАЧХ интегратора при вариации параметров **R и **C** во вложенных циклах**

Можно заметить, что семейство содержит только 9 характеристик. Происходит это из-за наложения друг на друга характеристик, полученных при сочетании $R=1 \text{ кОм} \cup C=0.99 \text{ мкФ}$ и $R=1.5 \text{ кОм} \cup C=0.66 \text{ мкФ}$. Нетрудно убедиться, что оба сочетания дают одинаковую постоянную времени $\tau = 0.99 \text{ мс}$, что приводит к одинаковым характеристикам.

Для того чтобы узнать, при каких сочетаниях параметров R и C была получена та или иная характеристика семейства следует применить команду *Scope/Label Branches*. В результате возле каждой характеристики семейства автоматически появляются наименования параметров и их числовые значения. Иногда автоматически нанесенная на график информация располагается неудачно – например, надписи перекрываются или расположены очень плотно; все это затрудняет анализ графиков. В таких случаях рекомендуется применять дополнительное ручное редактирование. Так, на рисунке 14 шрифт надписей был увеличен, надписи разнесены друг относительно друга, каждая надпись снабжена выноской для точного позиционирования.

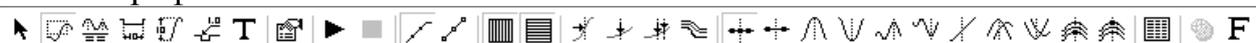
Существует способ оперативного зондирования каждой характеристики семейства с целью определения соответствующих значений параметров. Для этого достаточно навести указатель мыши на интересующую характеристику семейства. При этом в строке статуса, в правом нижнем углу появятся сведения о значениях параметров. Например, если навести указатель мыши на самую верхнюю характеристику семейства (рисунок 14), то в строке статуса будет представлена информация:

$F=187.251 \text{ db}(v(\text{OUT}))=8.134 \text{ C}=330\text{n} \text{ R}=1\text{K}$

Первые два числовых значения показывают текущие координаты указателя мыши при его наведении на характеристику. Последние два значения – комбинация параметров R и C , соответствующая выбранной характеристике. Заметим, что особого значения координаты указателя мыши не имеют, т.к. наведение можно сделать в любую точку, принадлежащую характеристике.

Прием №5. Анализ графиков в режиме электронного курсора.

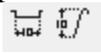
Программа MicroCAP имеет специальную панель инструментов для работы с графиками.



Эта панель доступна только во время отображения графиков на экране. Действия пиктограмм дублируются также пунктами меню *Options* и *Scope*. Поочередное нажатие на первые семь пиктограмм обуславливает следующие режимы работы с графиками:

1.  - режим выбора объектов (Select Mode), изображенных на экране;
2.  - режим масштабирования (Scale Mode), позволяет увеличивать произвольные фрагменты графиков; при этом следует сначала с помощью мыши протянуть воображаемый прямоугольник над тем фрагментом, который нужно увеличить;

3.  - режим электронного курсора (Cursor Mode), позволяет считать координаты одной или двух точек на графике.

4.  - режимы измерения по горизонтали и вертикали (Horizontal Tag Mode и Vertical Tag Mode), соответственно; позволяют оценивать расстояние между двумя выбранными точками графика;

5.  - режим нанесения на график значений координат выбранной точки (Tag Mode);

6. **T** - текстовый режим (Text Mode); позволяет наносить произвольный текст на графики, в том числе и по-русски.

При выполнении последующих лабораторных заданий наиболее часто будет востребован режим электронного курсора. Рассмотрим этот режим более подробно. При его включении в крайней левой и правой позициях функции, изображенной на графике, появятся изображения курсоров с указанием текущих координат. Курсоры можно скачкообразно перемещать в любую точку функции нажатием левой или правой кнопок мыши. Более плавного перемещения левого курсора можно добиться с помощью кнопок $\langle \rightarrow \rangle$ и $\langle \leftarrow \rangle$. Передвижение правого курсора осуществляется сочетанием клавиш $\langle \text{Shift} \rangle + \langle \rightarrow \rangle$ и $\langle \text{Shift} \rangle + \langle \leftarrow \rangle$. Электронные курсоры ассоциированы с той функцией, чье наименование в текущий момент подчеркнуто в нижней части графика. Например, на рисунке 8 подчеркнуто наименование единственной функции ЛАЧХ $\text{db}(v(\text{OUT}))$.

В нижней части под графиком также располагается таблица, число строк которой равно числу построенных функций плюс одна строка, в которой размещаются значения аргумента, откладываемого по оси X (время, частота и т.д.). В колонках таблицы располагается информация:

- имя переменной, выведенной на график;
- **Left** – значение переменной, помеченной левой курсором;
- **Right** – значение переменной, помеченной правым курсором;
- **Delta** – разность значений координат курсора;
- **Slope** – тангенс угла наклона прямой, соединяющей два курсора.

Если на экране представлено семейство характеристик одной и той же функции (как на рисунке 14), то переход курсоров с одной характеристики на другую происходит нажатием на клавиши $\langle \uparrow \rangle$ и $\langle \downarrow \rangle$.

Предположим, что по графику семейства ЛАЧХ, представленному на рисунке 14, необходимо найти точное значение частоты единичного усиления для каждого случая. Поставленная задача выполняется поэтапно:

1. Нажатием на пиктограмму  на панели инструментов переходят в режим электронного курсора.

2. Клавишами \uparrow или \downarrow выбирают требуемую характеристику. Например, на рисунке 15 выбрана самая верхняя характеристика. Контроль текущей

комбинации параметров ведут по строке заголовка. Из рисунка видно, что выбранная характеристика соответствует $R = 1\text{кОм}$; $C = 0.33\text{мкФ}$.

3. Нажатием на пиктограмму  на панели инструментов вызывают диалоговое окно **Go To Y** (Переход к значению Y). В строке ввода **Value** одноименной вкладки указывают требуемое значение ординаты; в нашем случае $Y = 0$. Работу с диалоговым окном завершают нажатием на кнопку **Right**.

4. Правый электронный курсор перемещается в искомую точку, при этом значение абсциссы $X = 482$ Гц соответствует единичной частоте усиления. Иногда, как, например, на рисунке 15, отмеченная ордината представляет собой бесконечно малую величину ($-1.155 \cdot 10^{-14}$), что равносильно нахождению нулевой ординаты.

5. Закрывают диалоговое окно **Go To Y** и возвращаются к пункту 2.

Аналогичным способом можно решить обратную задачу – нахождение значений аргументов при заданных значениях функции. Для этой цели служит пиктограмма  на панели инструментов, вызывающая диалоговое окно **Go To X** (Переход к значению X).

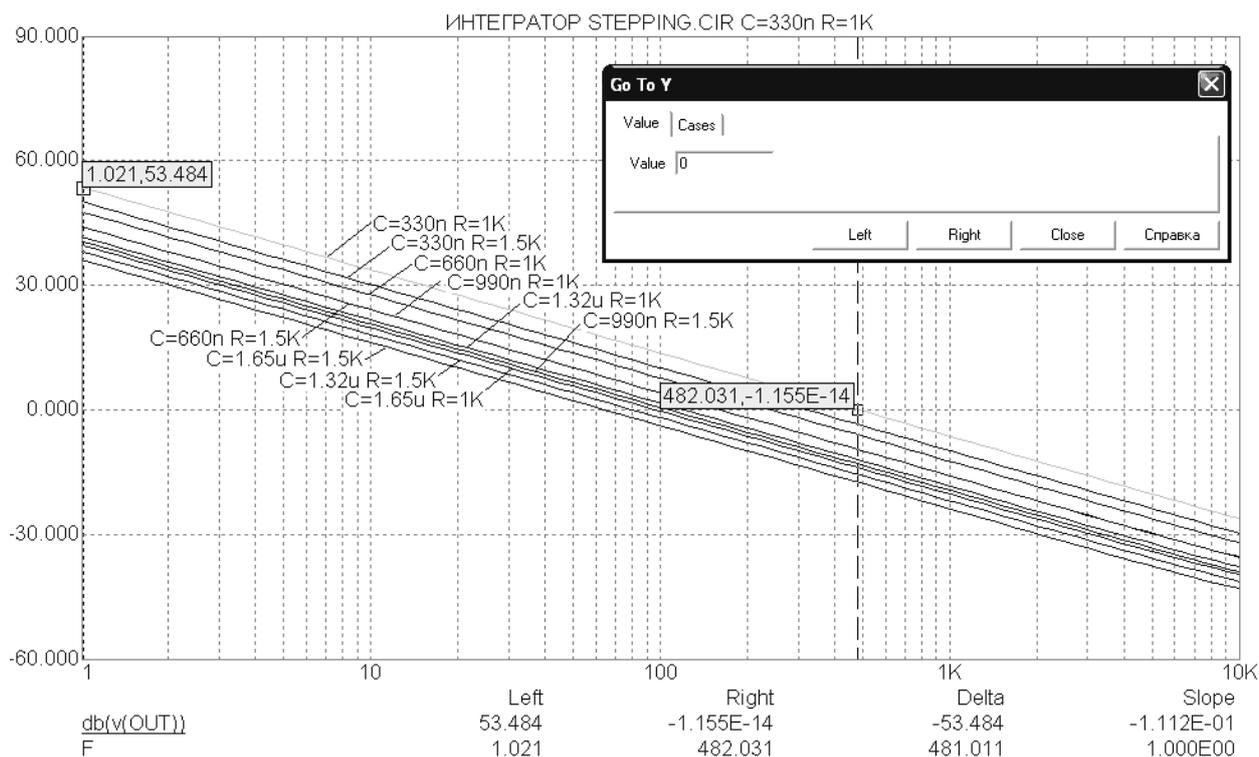


Рисунок 15 – Нахождение частоты единичного усиления в режиме электронного курсора

1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 – СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЭА ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

1.1 Цель работы

В ходе выполнения настоящей работы предусматривается:

- 1) изучение статистического метода исследования по Монте-Карло;
- 2) знакомство со способами задания случайных величин в программах MathCAD и MicroCAP;
- 3) приобретение навыков построения гистограмм распределения случайных величин;
- 4) знакомство с некоторыми свойствами нормального закона распределения случайных величин.

1.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания к лабораторной работе.
2. Письменно, в отчете по лабораторной работе ответить на контрольные вопросы.
3. Внимательно ознакомиться с методическим примером, приведенным в пункте 1.4.
4. Выполнить лабораторное задание согласно варианту задания.
5. Сделать выводы по работе.

Внимание! Отчет по лабораторной работе в обязательном порядке должен содержать: схемы включения, графики зависимостей, все необходимые расчеты и их результаты, текстовые пояснения. На графиках в отчете должны присутствовать единицы измерения, масштаб, цена деления.

Отчет по лабораторной работе целесообразно выполнять на двойных тетрадных листках с целью облегчения построения графиков.

1.3 Постановка задачи статистического анализа элементов на ЭВМ

Метод статистического анализа элементов на ЭВМ имеет много общего с экспериментальными статистическими методами в расчетных соотношениях, применяемых для обработки выходных параметров. Основное различие этих методов заключается в способах задания случайных значений внутренним параметрам схемы.

При экспериментальном исследовании образцов схем, построенных на дискретных компонентах, корреляционные связи существуют в основном между внутренними параметрами, относящимися к комплектующим приборам (диодам, транзисторам). Их учитывают автоматически при изготовлении образцов схем. Если, например, параметр τ транзистора имеет корреляционную связь с параметром B , то при установке в экспериментальные схемы разных образцов транзисторов и измерении их параметров эта связь будет учтена, так как транзистор представляет собой единый прибор. При машинных методах статистического анализа схем внутренние корреляционные связи необходимо учитывать при задании набора значений для очередного варианта расчета параметров выходных сигналов. Исходные данные для статистической обработки требуют проведения N вариантов расчета выходных параметров. Для каждого из вариантов необходим набор значений внутренних параметров x_i , представляющих собой случайные величины. Законы распределения случайных величин должны соответствовать законам распределения внутренних параметров как по форме, так и по числовым характеристикам.

Многовариантный статистический анализ схемы возможен при наличии сведений о законах распределения и взаимных корреляционных связях внутренних параметров. Эти сведения можно получить путем достаточно большого количества измерений параметров изготовленных дискретных или интегральных компонентов. При идентичной технологии и условиях производства статистические сведения о параметрах компонентов могут быть распространены на обширные группы схем, построенных на этих компонентах.

Количественная оценка отклонений выходных параметров за счет изменений внутренних и внешних параметров может быть проведена на основе соотношения, показывающего зависимость j -ого выходного параметра y_j :

$$y_j = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m), \quad (1.1)$$

где x_i – значения внутренних параметров; q_k – значения дестабилизирующих (внешних) факторов.

Если зависимость (1.1) известна, то, воспользовавшись разложением в ряд Тейлора с точностью до первых членов, получим:

$$\begin{aligned} \Delta y_j = & \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial x_i} \Delta x_i + \\ & + \sum_{k=1}^m \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial q_k} \Delta q_k. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Для практических применений более удобны безразмерные относительные величины, т.е.:

$$\delta y_j = \frac{\Delta y_j}{y_{j0}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{x_i}$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{x_{i0}}{f(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}; q_{10}, \dots, q_{k0}, \dots, q_{m0})} \cdot \frac{\Delta x_i}{x_{i0}} + \\
& + \sum_{k=1}^m \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial q_k} \times \\
& \times \frac{q_{k0}}{f(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}; q_{10}, \dots, q_{k0}, \dots, q_{m0})} \cdot \frac{\Delta q_k}{q_{k0}}. \quad (1.3)
\end{aligned}$$

В (1.3) выходные, внутренние и внешние параметры представлены в виде безразмерных относительных величин $\delta y_j = \frac{\Delta y_j}{y_{j0}}$; $\delta x_i = \frac{\Delta x_i}{x_{i0}}$; $\delta q_k = \frac{\Delta q_k}{q_{k0}}$.

Коэффициенты, стоящие перед абсолютными Δx_i и Δq_k и относительными δx_i и δq_k отклонениями, характеризуют степень влияния отклонений соответствующего параметра x_i или q_k на изменение j -ого выходного параметра.

Величины A_{ji} , A_{jk} и B_{ji} , B_{jk} называют соответственно абсолютными и относительными коэффициентами чувствительности. Например, B_{ji} – относительный коэффициент чувствительности j -ого выходного параметра от i -ого внутреннего параметра:

$$A_{ji} = \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial x_i}; \quad (1.4)$$

$$A_{jk} = \frac{\partial f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; q_1, \dots, q_k, \dots, q_m)}{\partial q_k}; \quad (1.4a)$$

$$B_{ji} = A_{ji} \frac{x_{i0}}{f(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}; q_{10}, \dots, q_{k0}, \dots, q_{m0})}; \quad (1.5)$$

$$B_{jk} = A_{jk} \frac{q_{k0}}{f(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}; q_{10}, \dots, q_{k0}, \dots, q_{m0})}. \quad (1.5a)$$

Зависимости (1.2), как правило, нелинейны. Поэтому применение метода квадратичного суммирования для вычисления среднеквадратического отклонения выходного параметра допустимо лишь при условии достаточной малости Δx_i . В рамках аналитического вероятностного метода трудно получить ответ на вопрос о том, какие Δx_i можно считать достаточно малыми. Казалось бы, что этот вопрос легко решить, оценивая члены второго порядка в разложении (1.2) в ряд Тейлора. Однако такая оценка практически возможна лишь в случаях, когда зависимость (1.2) задана в аналитическом виде. Чаще инженер не имеет аналитических выражений и получает коэффициенты влияния с помощью экспериментальных методов анализа чувствительности. Например, чтобы показать, какими могут быть погрешности применения (1.2) к анализу нелинейных электронных схем, были определены выходные параметры схемы инвертора для двух вариантов, различавшихся значениями $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. В каждом варианте анализ проводился на основе нелинейной

математической модели схемы в виде системы дифференциальных уравнений и упрощенной линейной математической модели в виде (1.2), полученной после анализа чувствительности схемы. При случайном задании \mathbf{X} в пределах 20-процентных отклонений от $\mathbf{X}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, x_{2\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$ получены расхождения $\Delta y_j = y_j - y_{j\text{ном}}$ в нелинейной и линейной моделях, достигающие для некоторых y_j сотен процентов.

Следовательно, линеаризация (1.2) – главный и решающий недостаток аналитического вероятностного метода. Кроме того, в этом методе оценка вероятности выполнения условий работоспособности просто решается лишь при допущении о том, что законы распределения выходных параметров нормальные. Если обозначить совокупность технических требований вектором $\mathbf{TT} = TT_1, TT_2, \dots, TT_m$, то вероятность P выполнения условия работоспособности типа $y_j < TT_j$ (уменьшение значения параметра соответствует улучшению свойств элемента) определяется так:

$$P(y_j < TT_j) = \Phi \left[\frac{TT_j - M_j}{\sigma_j} \right] + 0.5,$$

где Φ – функция Лапласа (интеграл вероятностей).

Как можно видеть, машинное проектирование требует пересмотра основ расчетных методов, поскольку методы, ориентированные на ручные вычисления, как правило, не обеспечивают необходимой точности и имеют заметные ограничения на области их применения. Очевидно, что по указанным выше причинам основу статистического анализа нелинейных электронных схем на ЭВМ не могут составить аналитические вероятностные методы.

Отказ от линеаризации математической модели схемы (ММС) означает, что связь y_j с x_i и q_k дается системой дифференциальных:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{V}, t),$$

или алгебраических уравнений:

$$\mathbf{f}(\mathbf{V}) = 0,$$

где \mathbf{V} – вектор переменных состояния; t – время.

Таким образом, основным методом статистического анализа схем должен быть метод Монте-Карло (метод статистических испытаний) [6], а аналитические вероятностные методы могут применяться только как вспомогательные.

Постановка задачи статистического анализа электронных схем на ЭВМ рождает, например, такие проблемы: 1) повышение точности и полноты исходных статистических сведений о параметрах компонентов; 2) реализация метода Монте-Карло на ЭВМ.

Сложность решения первой из этих проблем обуславливается большим объемом необходимых исходных статистических сведений, неодинаковостью законов распределения разнотипных параметров компонентов, нестабильно-

стью числовых характеристик этих распределений в процессе производства. В случае интегральных схем объем исходной информации значительно возрастает из-за возникновения заметных корреляционных связей между параметрами всех компонентов, расположенных на единой подложке. Теснота корреляционной связи зависит от характера размещения компонентов на подложке, и, следовательно, матрица вторых моментов распределения n -мерного случайного вектора параметров компонентов не может стать известной до выполнения этапа проектирования топологических схем. Получение статистических сведений о параметрах компонентов происходит путем измерения параметров у партии приборов. Естественно, что ранее накопленные сведения широко используют при расчетах новых схем, если технология изготовления и условия отбраковки компонентов остаются неизменными. В противном случае необходимо заново выполнить измерения и произвести обработку результатов этих измерений.

Схема вычислений при использовании метода Монте-Карло довольно проста и включает в себя следующие процедуры:

1. Реализация случайного вектора \mathbf{X} , т.е. выработка случайных значений параметров компонентов x_i , в соответствии с их законами распределения.
2. Одновариантный анализ схемы при полученной реализации \mathbf{X} (при этом определяется реализация вектора выходных параметров \mathbf{Y}).
3. Обработка результатов выполненного испытания.
4. Если $l \leq N$, то переход к оператору l (здесь l – номер следующего испытания, N – заданное количество испытаний).
5. Обработка результатов N испытаний.

Специфичными для статистического анализа являются алгоритмы процедур 1, 3 и 5. Наряду с разработкой этих алгоритмов необходимо решить вопросы, связанные с определением значений внешних параметров q_k в процессе статистических испытаний, с выбором количества испытаний N и с построением алгоритмов статистической обработки результатов измерения параметров компонентов.

Различие между внутренними и внешними параметрами при статистическом анализе проявляется, прежде всего, в том, что внутренние параметры x_i – случайные величины, законы распределения которых принципиально могут быть известны при проектировании схемы, а внешние параметры q_k не могут рассматриваться как случайные величины с заданными законами распределения. Действительно, экземпляр схемы при конкретных значениях x_i должен быть признан негодным, если он не удовлетворяет техническим требованиям хотя бы на узких участках оговоренных в ТЗ диапазонов изменения внешних параметров. Отсюда очевидно, что если влияние разброса x_i на рассеяние y_j целесообразно исследовать вероятностными методами, то влияние нестабильности q_k необходимо учитывать по методу наихудшего случая.

Таким образом, указанная выше схема вычислений по методу Монте-Карло должна быть дополнена предварительной процедурой определения тяжелых режимов. В тяжелом режиме все внутренние параметры имеют номинальные значения, т.е. $x_i = x_{i\text{ном}}$, а внешние параметры выбраны из условий наихудшего для некоторого y_j случая. Очевидно, что количество тяжелых режимов не превышает количества m условий работоспособности и может быть заметно меньше m при совпадении тяжелых режимов нескольких выходных параметров. Определяют тяжелые режимы путем анализа чувствительности выходных параметров к изменениям внешних параметров. При этом предполагают монотонность зависимостей y_j от q_k .

Определение числа N необходимых испытаний является важным вопросом, так как от N зависят затраты машинного времени и погрешности анализа. Для большинства схем значение N находится в диапазоне 50...200. Поэтому задача сводится к выяснению погрешностей результатов статистического анализа при заданном N . Используя способы оценки погрешностей метода Монте-Карло, указанные, например, в [6], можно подсчитать, что с доверительной вероятностью $\gamma = 0.9...0.95$ погрешность оценки математического ожидания выходного параметра будет находиться в пределах примерно $\pm(12...24)\%$, а погрешность оценки среднеквадратичного отклонения – приблизительно в пределах $\pm(10...23)\%$ от величины выборочного среднеквадратичного отклонения, если $N = 50...200$.

При большом количестве неодинаковых тяжелых режимов статистический анализ должен производиться многократно. Статистический анализ в целом ряде отображающих точек (ОТ) пространства параметров компонентов (имеется в виду, что оси координат пространства соответствуют номинальным значениям параметров компонентов) требуется также при реализации некоторых алгоритмов оптимизации электронных схем.

Пусть δ_j и γ_j – разные характеристики рассеяния одного и того же выходного параметра в пространстве параметров компонентов (отношение δ_j к γ_j , будет более стабильным, чем сами характеристики δ_j и γ_j) и δ_j более точно характеризует рассеяние, но оценка δ_j требует большего объема вычислений, чем γ_j . Тогда в некоторой отображающей точке l рассчитываются $\delta_j^{\text{О}}$ и $\gamma_j^{\text{О}}$, и определяется коэффициент $\beta_j^{\text{О}} = \frac{\delta_j^{\text{О}}}{\gamma_j^{\text{О}}}$. В любой другой отображающей точке r вычисляется только $\gamma_j^{\text{Р}}$, поскольку при допущении $\beta_j^{\text{О}} = \beta_j^{\text{Р}}$ оценка $\delta_j^{\text{Р}}$ получается по формуле:

$$\delta_j^{\text{Р}} = \beta_j^{\text{О}} \gamma_j^{\text{Р}}. \quad (1.6)$$

В качестве δ_j , удобно иметь величину $\delta_j = y_{gj} - y_{j\text{ном}}$, где y_{gj} – g -процентиль распределения y_j ; y_{gj} – находится в исходной ОТ по методу Монте-Карло.

Под γ_j можно понимать величину:

$$\gamma_j = y_j(\mathbf{X}_{\text{ном}} \pm k\Delta\mathbf{X}_{\text{max}}) - y_{j\text{ном}},$$

где $y_j(\mathbf{X}_{\text{ном}} \pm k\Delta\mathbf{X}_{\text{max}})$ – значение y_j , найденное при отклонении всех x_i от номинальных значений на $k\Delta x_{i\text{max}}$ в сторону, определяемую по правилам наихудшего случая (здесь $0 < k \leq 1$, $\Delta x_{i\text{max}}$ – половина поля допуска параметра x_i). Для определения γ_j , если считать, что все m выходных параметров имеют одностороннее ограничение по ТЗ, требуется m вариантов анализа работы схемы, т.е. заметно меньше, чем при статистическом анализе по методу Монте-Карло. При этом необходимо также принять допущение $\text{sign } A_{ji} = \text{const}$ во всех отображающих точках, так как отклонение x_i на величины $k\Delta x_{i\text{max}}$ производится исходя из знания знаков коэффициентов влияния, определенных в начальной l -й точке.

Из допущений $\beta_j = \text{const}$ и $\text{sign } A_{ji} = \text{const}$ важнее первое. Приближенная оценка погрешности, обусловливаемой применением (1.6), может быть выполнена, если справедлива линеаризация зависимости (1.2) и параметры компонентов являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону.

Тогда $\delta_j = y_{j\text{ном}} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{ji}^2 \delta_i^2}$ (где B_{ji} – относительный коэффициент влияния x_i на y_j) и $\delta_i = \frac{x_{ig} - x_{i\text{ном}}}{x_{i\text{ном}}}$ (где x_{ig} – квантиль порядка g распределения x_i).

Обозначим $\alpha_{ji} = |B_{ji}\delta_i|$ и $k_{ji} = \frac{\alpha_{ji}}{\max_{i \in \{1, n\}} \alpha_{ji}}$. Относительное отклонение

выходного параметра вычисляется по формуле:

$$\delta y_{j\text{max}} = \sum_{i=1}^n |B_{ji} \delta x_{i\text{max}}|, \quad (1.7)$$

где $\delta y_{j\text{max}}$ и $\delta x_{i\text{max}}$ – максимальные относительные отклонения j -ого выходного параметра и i -ого внутреннего параметра, соответственно.

Из (1.7) имеем $\gamma_j = y_{j\text{ном}} \sum_{i=1}^n \alpha_{ji}$, тогда:

$$\beta_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_{ji}^2}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ji}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_{ji}^2}}{\sum_{i=1}^n k_{ji}}. \quad (1.8)$$

Минимум β_j при заданном n достигается при одинаковых α_{ji} , т.е. при $k_{ji} = 1$ для всех i (при этом $\beta_j = \frac{1}{\sqrt{n}}$).

Формула (1.8) позволяет оценить β_j для разных ОТ, если известны коэффициенты влияния в этих точках. Априорная оценка величины и стабильности β_j может быть выполнена только при наличии достаточно подробных статистических сведений о характере изменений B_{ji} в пространстве параметров компонентов для того или иного класса электронных схем.

Сложность алгоритма выработки псевдослучайных значений параметров компонентов x_i обуславливается разнообразием законов распределения и коррелированностью x_i . При этом целесообразно разделение алгоритма на два блока. Первый блок выполняется при обработке результатов измерений параметров, его назначение – вычисление параметров преобразования $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{Z})$ и определение числовых характеристик n -мерного случайного вектора \mathbf{Z} , имеющего нормальное распределение (здесь \mathbf{X} – n -мерный случайный вектор параметров компонентов). Второй блок реализуется непосредственно в программе статистического анализа, его назначение – выработка псевдослучайных значений нормально распределенных элементов вектора \mathbf{Z} с последующим их пересчетом в значения элементов вектора \mathbf{X} .

Определение составляющих нормально распределенного вектора. Пусть x и z – непрерывные случайные величины, связанные взаимно однозначным соотношением $z = z(x)$, имеющие плотности распределения φ_z и φ_x соответственно, причем $\varphi_z \stackrel{\text{с}}{=} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-0.5 \frac{(z - M_z)^2}{\sigma_z^2}\right]$, где M_z и σ_z – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение величины z . Тогда из [7] имеем:

$$\varphi_z(z)dz = \varphi_x[x(z)]dx. \quad (1.9)$$

Далее запишем:

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} \varphi_x(x)dx \approx W_k \stackrel{\text{с}}{=} \frac{\Delta N_k}{N},$$

где ΔN_k и W_k – число попаданий и частота попадания в k -ый интервал гистограммы при измерении параметра x на партии компонентов из N штук. Но

$$\int_{z_k}^{z_{k+1}} \varphi_z(z) dz = \Phi(z_{k+1}) - \Phi(z_k), \text{ где } \Phi - \text{интеграл вероятностей,}$$

$$u_k = \frac{z(x_k) - M_z}{\sigma_z}.$$

Поэтому $\Phi(u_{k+1}) - \Phi(u_k) = W_k(x_{k+1} - x_k)$. Отсюда алгоритм вычисления функции $z(x)$ в табулированном виде будет следующей:

1. Задаемся $M_z = 0$, $\sigma_z = 1$; положим $\Phi(u_0) = -0.5$.
2. Начало цикла по параметру k с начальным значением $k = 1$.
3. Вычисляем $\Phi(u_k) = W_k(x_k - x_{k-1}) + \Phi(u_{k-1})$.
4. По таблице интеграла вероятностей определяем $z_k = u_k$.
5. Конец цикла.

Задание взаимно коррелированных параметров. Задание случайных значений взаимозависимым параметрам следует производить в соответствии с их условными распределениями. Математическое ожидание условного распределения величины z , имеющей корреляционную зависимость от x , определяют на основании уравнения регрессии z по x . В случае линейной корреляции уравнение регрессии z по x имеет вид:

$$M_{z_{\text{усл}}} = M_z + r_{zx} \frac{\sigma_z}{\sigma_x} (x - M_x), \quad (1.10)$$

где M_z и M_x – математические ожидания безусловных распределений, σ_z и σ_x – среднеквадратичные отклонения безусловных распределений; r_{zx} – коэффициент корреляции величин z и x ; $M_{z_{\text{усл}}}$ – математическое ожидание условного распределения величины z .

Это уравнение может быть применено и в случае нелинейных корреляционных зависимостей между внутренними параметрами. Имеющиеся в настоящее время статистические сведения о взаимной связи параметров транзисторов и диодов свидетельствуют о допустимости линейной аппроксимации без существенных погрешностей в результатах моделирования. Функция (1.10) является наилучшим линейным приближением к функции регрессии в смысле минимума среднеквадратичного отклонения величины z от линейной функции. При наличии нескольких коррелированных между собой случайных величин математические ожидания и среднеквадратичные отклонения условных распределений определяют по аналогичным формулам.

Определение числовых характеристик распределения выходных параметров. Для автоматического анализа выходных сигналов необходимо иметь унифицированную систему выходных параметров, отражающих с количественной стороны основные характеристики сигналов.

Определение численных значений выходных параметров целесообразно проводить так, чтобы иметь малые затраты машинного времени и не перегружать запоминающие устройства ЭВМ. В результате N вариантов расчета электронной схемы (метод Монте-Карло) получают ряд значений выходных параметров $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m$. Обработка результатов расчетов заключается в определении числовых характеристик совместного распределения выходных параметров:

$$\varphi(\mathbf{Y}) = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m). \quad (1.11)$$

Случайные отклонения каждого из выходных параметров от своего номинального значения определяются совокупностью довольно большого количества случайных отклонений внутренних параметров. При этом максимально возможное по ТУ отклонение любого внутреннего параметра изменяет выходной параметр не более чем на величину среднеквадратичного отклонения. Поэтому центральная предельная теорема позволяет считать совместный закон распределения обобщенного n -мерного вектора нормальным. Составляющие этого вектора также имеют распределения, описываемые нормальным законом.

Если считать, что совместное распределение и распределения составляющих подчиняются нормальному закону распределения, то определение числовых характеристик совместного распределения можно проводить в следующей последовательности.

Отыскание числовых характеристик распределений составляющих и в первую очередь следующих характеристик: а) выборочные средние значения параметров M_{yj} ; б) оценки среднеквадратичных отклонений σ_{yj} ; в) выборочные коэффициенты взаимной корреляции между выходными параметрами r_{jk} ; г) выборочные коэффициенты корреляции между выходными и внутренними параметрами r_{yx} .

Вычисления выборочных значений числовых характеристик распределений целесообразно производить при помощи следующих выражений:

$$M_{yj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ji}; \quad (1.12)$$

$$\sigma_{yj}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_{ji}^2 - \frac{N}{N-1} M_{yj}^2; \quad (1.13)$$

$$r_{jk} = \frac{1}{\sigma_{yj} \sigma_{yk}} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_{ki} y_{ji} - \frac{N}{N-1} M_{yk} M_{yj} \right]; \quad (1.14)$$

$$r_{yx} = \frac{1}{\sigma_{yi} \sigma_{yl}} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_{li} y_{ji} - \frac{N}{N-1} M_{xl} M_{yj} \right], \quad (1.15)$$

где i – номер варианта моделирования; j, k – номера выходных параметров; l – номер внутреннего параметра.

1.4 Пример статистического анализа по методу Монте-Карло

Требуется провести статистический анализ по методу Монте-Карло активного фильтра низких частот (ФНЧ), типовая схема и идеализированная ЛАЧХ которого представлены на рисунке 1.1.

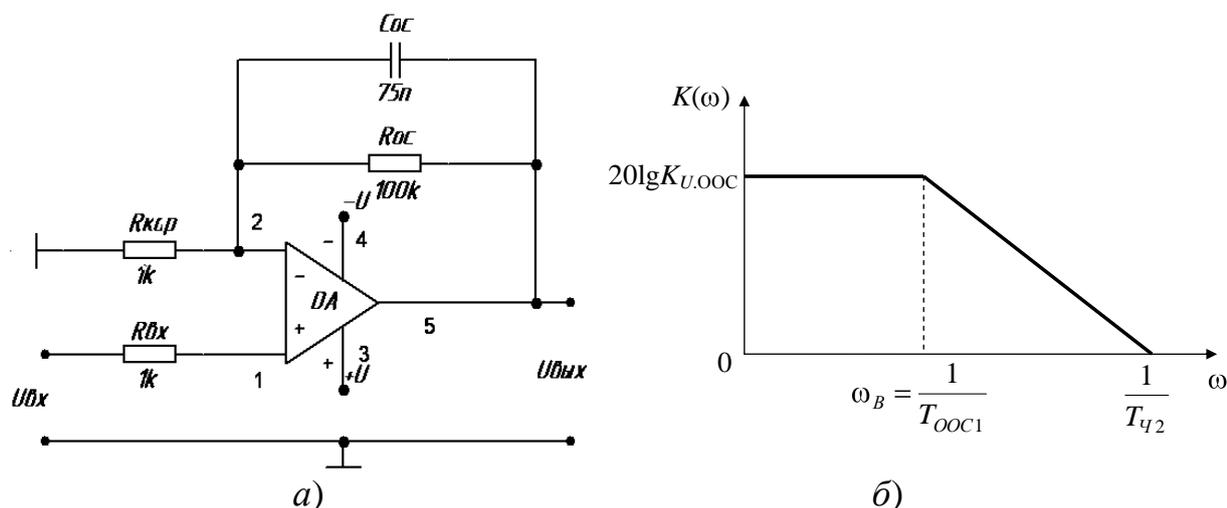


Рисунок 1.1 – Типовая схема ФНЧ (а) и его идеализированная ЛАЧХ (б)

Предполагается, что партия электрорадиоэлементов $R_{OC} = 100$ кОм и $C_{OC} = 75$ нФ в условиях серийного производства имеет случайный 10% разброс своих значений от номинального. Разброс значений подчинен нормальному (гауссовскому) распределению, что обуславливает случайные значения выходных параметров ФНЧ: верхней частоты полосы пропускания f_B и коэффициента передачи K_U . Сопротивления резисторов $R_{КОР} = R_{ВХ} = 1$ кОм, коэффициент усиления ОУ $K_{U0} = 10^6$.

Необходимо построить гистограмму распределения верхней частоты полосы пропускания ФНЧ по результатам измерений на партии из $N = 100$ штук ЭРЭ R_{OC} и C_{OC} . Требуется также найти основные числовые характеристики полученного распределения.

Полоса пропускания активного ФНЧ лежит в диапазоне от 0 Гц до значения верхней частоты f_B : $[0; f_B]$. Верхняя частота полосы пропускания f_B определяется по уровню -3 дБ от максимального значения коэффициента передачи фильтра K_U . При проведении исследования применяется «правило трех сигма» [5]: имея уровень доверительной вероятности 99.7%, будем утверждать, что случайные величины R_{OC} и C_{OC} отклоняются от своего математического ожидания не более, чем на 3σ . Т.к. разброс значений R_{OC} и C_{OC} от номинального значения известен заранее ($\delta = 10\%$), можно вычислить

среднеквадратичное отклонение нормального распределения (см. прием №2 раздела «Типовые приемы работы в MicroCAP...»):

$$\sigma_x = \frac{\delta\%}{100\%} \cdot \frac{M_x}{3},$$

где M_x – математическое ожидание случайной величины, в нашем случае равное номинальному значению величины R_{OC} или C_{OC} .

I этап. Статистическое исследование по методу Монте-Карло в системе MathCAD.

При выполнении этапа исследования использованы приемы №1-6 раздела «Типовые приемы работы в MathCAD...».

Ниже представлен листинг первой части исследования в MathCAD. Для большей наглядности приведена иллюстрация (рисунок 1.2) поля рассеяния случайных величин R_{OC} и C_{OC} . Можно видеть, что эти случайные величины не имеют взаимной корреляционной связи. Такой вид поля рассеяния характерен для параметров дискретных ЭРЭ.

Сопротивление $R_{вх}$	$R_{in} := 1000$	
Сопротивление $R_{кор}$	$R_{кор} := 1000$	
Кoeffициент усиления операционного усилителя	$K_{u0} := 10^6$	
Количество ЭРЭ в партии	$N := 100$	
Погрешность параметров ЭРЭ в партии, %	$\delta := 10$	
Среднеквадратическое отклонение при уровне доверительной вероятности 99.7%	$\sigma_d := 3$	
Математическое ожидание сопротивления резистора R_{oc}	$M_r := 100000$	
Среднеквадратическое отклонение сопротивления резистора R_{oc}	$\sigma_r := \frac{\delta}{100} \cdot \frac{M_r}{\sigma_d}$	$\sigma_r = 3.333 \times 10^3$
Математическое ожидание емкости конденсатора C_{oc}	$M_c := 75 \cdot 10^{-9}$	
Среднеквадратическое отклонение емкости конденсатора C_{oc}	$\sigma_c := \frac{\delta}{100} \cdot \frac{M_c}{\sigma_d}$	$\sigma_c = 2.5 \times 10^{-9}$
Задание вектора нормально распределенных значений сопротивления резистора	Задание вектора нормально распределенных значений емкости конденсатора	
$R_{os} := \text{norm}(N, M_r, \sigma_r)$	$C_{os} := \text{norm}(N, M_c, \sigma_c)$	

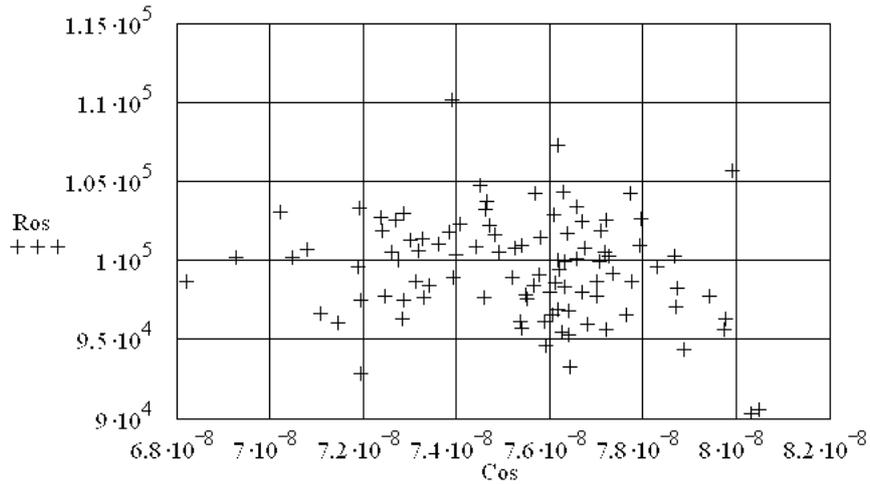


Рисунок 1.2 – Поле рассеяния случайных величин R_{OC} и C_{OC}

Построение ЛАЧХ требует, чтобы значения аргумента (частоты) представляли собой геометрическую прогрессию. Пусть шаг геометрической прогрессии $Step = 1.007$; количество расчетных точек $K = 1401$. Тогда каждое новое значение аргумента будет вычисляться по формуле $f_j = Step^j$, где $j = 0, 1, 2, \dots, 1400$. При этом диапазон значений аргумента [1 Гц; 17 428 Гц].

Передающая функция четырехполосника, включенного в цепь ООС усилителя (рисунок 1.1, а), имеет вид [3]:

$$W_{\text{ч}}(p) = \frac{K_{\text{ч}}(C_{\text{ч1}}p + 1)}{T_{\text{ч2}}p + 1},$$

где

$$K_{\text{ч}} = \frac{R_{\text{кор}}}{R_{\text{кор}} + R_{\text{ос}}};$$

$$T_{\text{ч1}} = R_{\text{ос}}C_{\text{ос}};$$

$$T_{\text{ч2}} = \frac{R_{\text{ос}}R_{\text{кор}}C_{\text{ос}}}{R_{\text{кор}} + R_{\text{ос}}}.$$

Тогда передаточная функция усилителя с $W_{\text{ч}}(p)$ в цепи ООС равна:

$$W_{\text{OY_OOC}}(p) = \frac{K_{u0}}{1 + K_{\text{ч}}K_{u0}} \cdot \frac{T_{\text{ч2}}p + 1}{\frac{C_{\text{ч2}} + K_{\text{ч}}K_{u0}T_{\text{ч1}}}{1 + K_{\text{ч}}K_{u0}}p + 1},$$

где K_{U0} – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

Если подставить в передаточную функцию ФНЧ номинальные значения R_{OC} и C_{OC} во всех расчетных точках, то получится АЧХ фильтра, соответствующая номинальным значениям и построенная в диапазоне [1 Гц; 17 428 Гц]. Верхняя частота полосы пропускания фильтра по условию должна определяться на уровне -3 дБ от максимального значения коэффициента передачи. Известно [3], что для ФНЧ максимальный коэффициент передачи имеет

место на постоянном токе, однако для нашего случая первая расчетная точка с максимальным значением функции соответствует $f = 1$ Гц. Последовательно перебирая все расчетные точки, начиная с первой, можно в программном цикле найти номер той точки, которая соответствует уровню АЧХ в -3 дБ.

В нижеприведенном листинге найдена верхняя частота полосы пропускания фильтра $f_B \approx 21$ Гц. Следовательно, при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC} полоса пропускания ФНЧ по уровню -3 дБ составляет 21 Гц (рисунок 1.3).

Шаг геометрической прогрессии для
вычисления очередного значения частоты $Step := 1.007$

Диапазон расчетных точек $j := 0..1400$

Табулирование диапазона частот от 1 Гц до 17 кГц $f_j := Step^j$

Номинальные значения компонентов передаточной функции фильтра

$$K_{chnom} := \frac{R_{kor}}{R_{kor} + M_r} \quad Tch1nom := M_r \cdot M_c \quad Tch2nom := \frac{M_r \cdot R_{kor} \cdot M_c}{R_{kor} + M_r}$$

Табулированная функция АЧХ фильтра для номинальных значений

$$Wnom_j := 20 \cdot \log \left[\left| \frac{Ku0}{1 + K_{chnom} \cdot Ku0} \cdot \frac{Tch2nom \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j) + 1}{(Tch2nom + K_{chnom} \cdot Ku0 \cdot Tch1nom) \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j)} \right| \cdot \frac{1}{1 + K_{chnom} \cdot Ku0} + 1 \right]$$

Нахождение номера отсчета, соответствующего уровню в -3 дБ
от максимального коэффициента передачи

```
Number_nom :=
  j ← 0
  while Wnom_j > Wnom_0 - 3
    j ← j + 1
  j
```

Нахождение пороговой частоты по уровню в -3 дБ

$$Freq_nom := Step^{Number_nom} \quad Freq_nom = 21.228$$

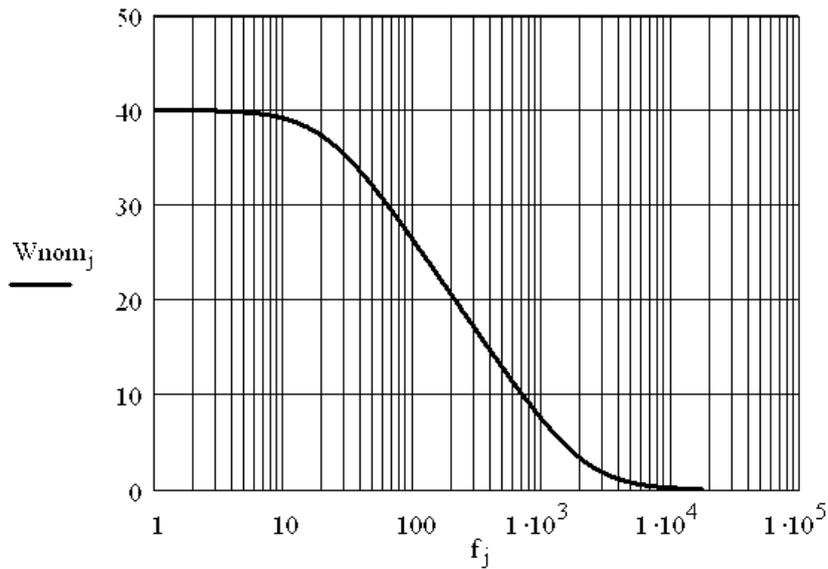


Рисунок 1.3 – ЛАЧХ при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC}

С точки зрения системы MathCAD, реализация статистического исследования по методу Монте-Карло заключается в составлении матрицы размерностью $N \times K$. Здесь N – число реализаций по методу Монте-Карло; K – число расчетных точек для построения ЛАЧХ. В каждой конкретной реализации в компоненты передаточной функции $K_{\text{ч}}$, $T_{\text{ч1}}$ и $T_{\text{ч2}}$ подставляются значения случайных величин R_{OC} и C_{OC} .

На рисунке 1.4 представлено семейство ЛАЧХ, построенное для первых десяти реализаций, из которого видно, что случайный разброс R_{OC} и C_{OC} обуславливает девиацию полосы пропускания фильтра. В нижеприведенном листинге найден вектор *Freq* значений верхней частоты полосы пропускания фильтра для каждой из N реализаций.

Диапазон реализаций $i := 0..(N - 1)$

Векторы значений для компонентов передаточной функции фильтра

$$K_{\text{ч}1_i} := \frac{R_{\text{kor}}}{R_{\text{kor}} + R_{\text{os}_i}} \quad T_{\text{ч}1_i} := R_{\text{os}_i} \cdot C_{\text{os}_i} \quad T_{\text{ч}2_i} := \frac{R_{\text{os}_i} \cdot R_{\text{kor}} \cdot C_{\text{os}_i}}{R_{\text{kor}} + R_{\text{os}_i}}$$

Семейство табулированных АЧХ фильтра

$$W_{i,j} := 20 \cdot \log \left[\left| \frac{K_{\text{u}0} \cdot \frac{T_{\text{ч}2_i} \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j) + 1}{(T_{\text{ч}2_i} + K_{\text{ч}1_i} \cdot K_{\text{u}0} \cdot T_{\text{ч}1_i) \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j)}}}{1 + K_{\text{ч}1_i} \cdot K_{\text{u}0}} + 1 \right| \right]$$

Вектор коэффициентов передачи фильтра на постоянном токе для каждой реализации

$$W_{\text{post}_i} := W_{i,0}$$

Вектор номеров отсчетов, соответствующих уровню в -3дБ от максимального коэффициента передачи для каждой реализации

$$\text{Number}(i) := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ \text{while } W_{i,j} \geq [W_{\text{post}_i} - 3] \\ \quad j \leftarrow j + 1 \\ j \end{cases}$$

Вектор пороговых частот по уровню в -3дБ для каждой реализации - суть полоса пропускания фильтра низких частот

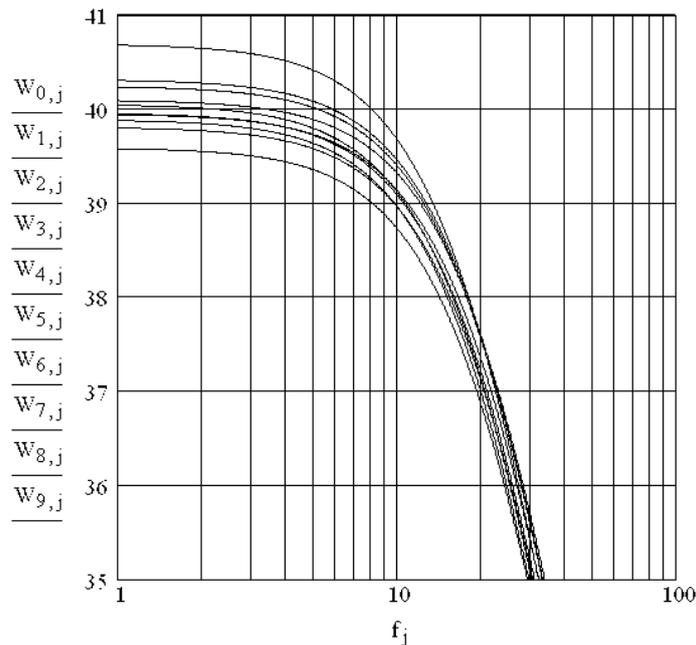
$$\text{Freq}_i := \text{Step}^{\text{Number}(i)}$$


Рисунок 1.4 – Семейство ЛАЧХ для первых десяти реализаций (увеличенный фрагмент НЧ области)

Заключительная часть исследования в MathCAD связана со статистической обработкой вектора *Freq* значений верхней частоты фильтра (нижеприведенный листинг) и построением гистограммы распределения (рисунок 1.5). Количество интервалов разбиения вычисляется по правилу Старджесса (см. прием №6 раздела «Типовые приемы работы в MathCAD...»).

Минимальное значение полосы пропускания $\text{Min}\Delta f := \min(\text{Freq})$ $\text{Min}\Delta f = 18.986$

Максимальное значение полосы пропускания $\text{Max}\Delta f := \max(\text{Freq})$ $\text{Max}\Delta f = 23.901$

Математическое ожидание полосы пропускания $\text{mean}(\text{Freq}) = 21.364$

Среднеквадратическое отклонение полосы пропускания $\text{stdev}(\text{Freq}) = 0.891$

Количество интервалов в гистограмме $\text{int} := \text{round}(1 + 3.3 \cdot \log(N), 0)$ $\text{int} = 8$

Ширина интервала $h := \frac{\text{Max}\Delta f - \text{Min}\Delta f}{\text{int}}$ $h = 0.614$

Построение гистограммы $g := \text{histogram}(\text{int}, \text{Freq})$

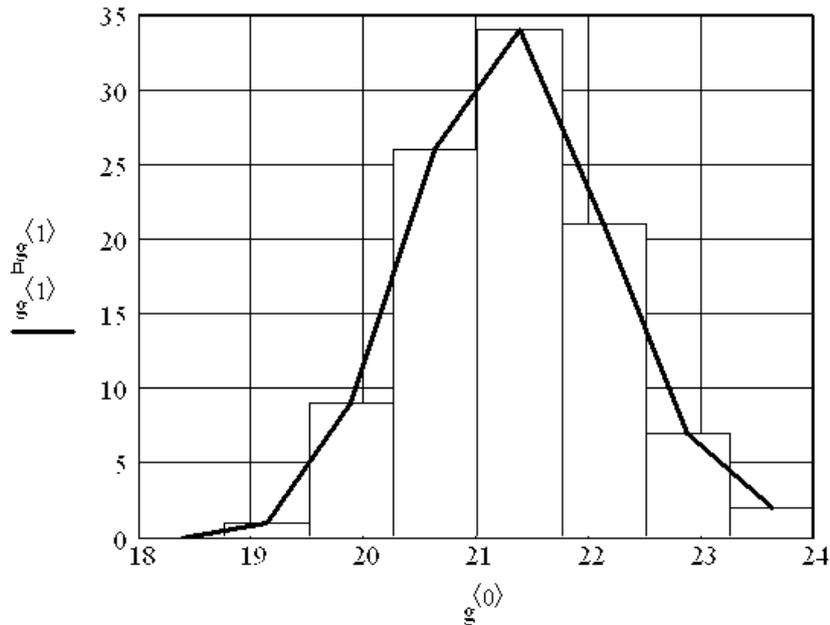


Рисунок 1.5 – Гистограмма распределения верхней частоты ФНЧ

II этап. Статистическое исследование по методу Монте-Карло в системе MicroCAP.

При выполнении этапа исследования использованы приемы №1-3 раздела «Типовые приемы работы в MicroCAP...».

Электрическая схема активного ФНЧ представлена на рисунке 1.6.

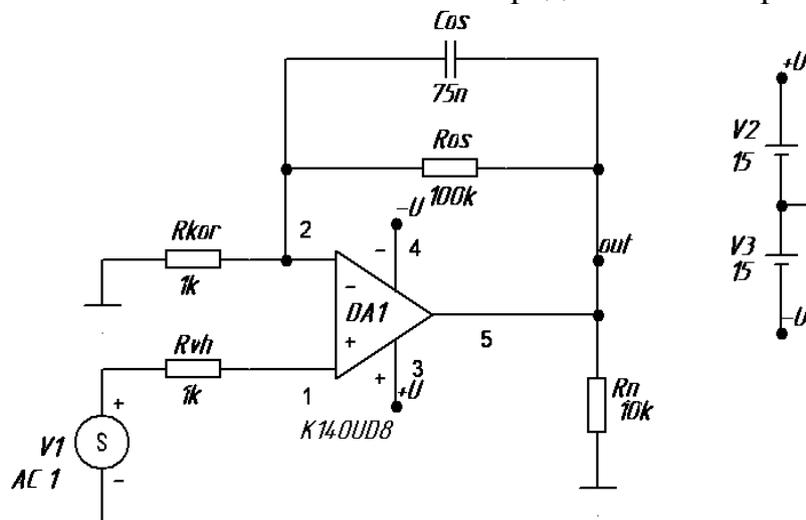


Рисунок 1.6 – Типовая схема активного ФНЧ

В схеме использован операционный усилитель К140УД8 с двуполярным питанием $\pm 15\text{В}$. Описание математической модели ОУ находится во внешнем файле `my_opamp.lib`.

В диалоговых окнах ЭРЭ модель резистора R_{OC} названа `MY_RES`, модель конденсатора C_{OC} – `MY_CAP`. Описание математических моделей `MY_RES` и `MY_CAP` редактируется вручную следующим образом:

.MODEL MY_RES RES (R=1 LOT=10%)

.MODEL MY_CAP CAP (C=1 LOT=10%)

В диалоговом окне свойств источника сигнала V1 в строке ввода **Value** указывают **AC 1** (амплитуда напряжения при анализе по переменному току 1В). Контрольная точка на выходе устройства названа нами **out**.

Перед началом исследования задается доверительная вероятность статистических оценок. Ранее было сказано, что доверительная вероятность в 99.7% соответствует разбросу случайных величин в 3σ . Для этого выполняется команда *Options/Global Settings*, и в диалоговом окне глобальных настроек **Global Settings** в строке **SD** указывают коэффициент **3**.

Моделирование в частотной области проводится по команде *Analysis/AC...* В появляющемся диалоговом окне **AC Analysis Limits** указывают:

- в строке ввода **Frequency Range** (Диапазон частот) **17k,1**;
- в строке **Number of Points** (Количество расчетных точек) **1401** - аналогично количеству расчетных точек при исследовании в MathCAD;
- в столбце **P** первой строки **1** – первый и единственный номер окна графика;
- в столбце **X Expression** (Выражение по X) **F** – резервированная переменная – частота;
- в столбце **Y Expression** (Выражение по Y) **db(v(out))** – значение напряжения в контрольной точке out в децибелах.

Кроме этого в диалоговом окне **AC Analysis Limits** в выпадающем списке **Frequency Step** (Шаг по частоте) выбирают значение **Log** (логарифмический); опцию **Auto Scale Range** (Автоматическое масштабирование) рекомендуется включить.

Для правильного представления на экране графика ЛАЧХ необходимо убедиться, что внешний вид первых двух графических кнопок слева от столбца **P** таков: . ЛАЧХ фильтра при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC} представлена на рисунке 1.7.

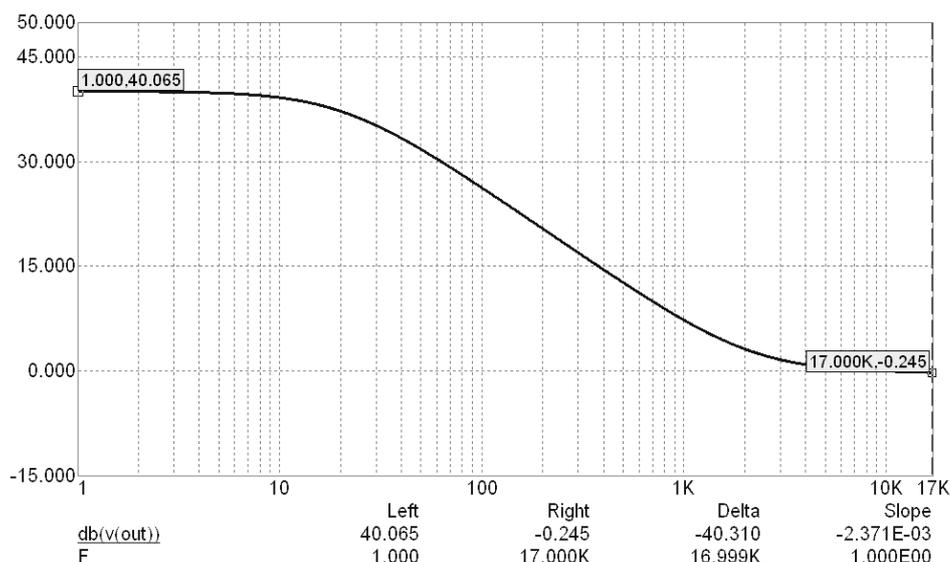
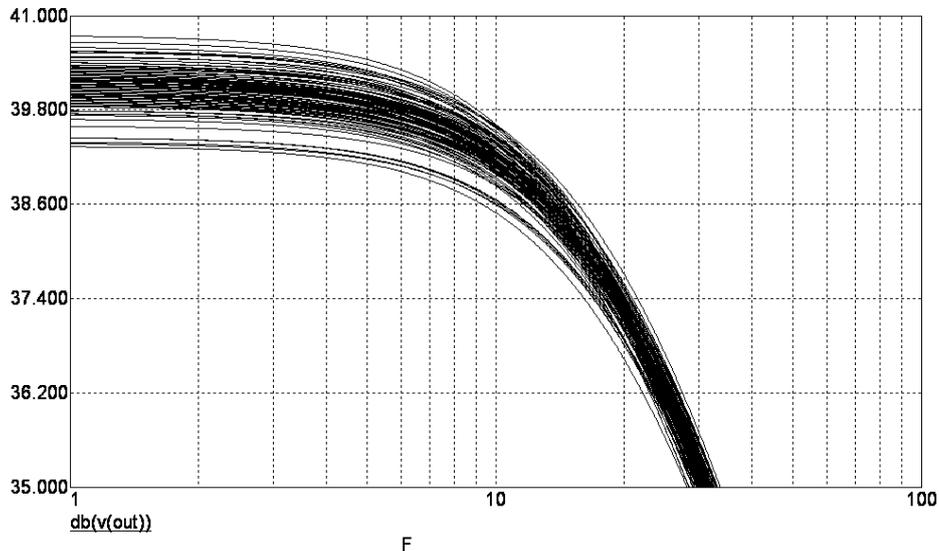


Рисунок 1.7 – ЛАЧХ фильтра при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC}

В диалоговом окне **Monte Carlo Options** в группе **Distribution to Use** выбирают значение **Gauss**. В группе **Status** выбирают значение **On**. В строке ввода **Number of Runs** указывают **100**. На рисунке 1.8 представлено семейство из 100 ЛАЧХ фильтра.



**Рисунок 1.8 – Семейство ЛАЧХ ФНЧ
(увеличенный фрагмент НЧ области)**

Дальнейший целевой анализ направлен на нахождение верхней частоты полосы пропускания ФНЧ, измеренной по уровню -3 дБ от максимального значения коэффициента передачи. Следовательно, требуется для каждой характеристики семейства сначала найти ординату максимума функции, затем определить ординату, меньшую на 3 единицы. Соответствующая этой ординате абсцисса является верхней частотой полосы пропускания. Заметим, что семейство функций монотонно убывающее, поэтому нахождение абсциссы всегда дает единственный результат.

Поставленную задачу по команде *Monte Carlo/Histograms/Add Histograms...* можно решить с использованием двух вложенных друг в друга шаблонов целевых функций **X_Level** и **High_Y**:

X_Level(db(v(out)),1,1,High_Y(db(v(out)),1)-3)

В этой записи: **X_Level** – шаблон целевой функции по нахождению абсциссы графика функции при известной ординате; **High_Y** – шаблон целевой функции по нахождению ординаты наибольшего значения функции. Заметим, что сначала целевая функция **High_Y(db(v(out)),1)-3** находит уровень ординаты в -3 дБ, который затем используется как аргумент целевой функцией **X_Level**.

Гистограмма распределения случайной величины – верхней частоты полосы пропускания фильтра представлена на рисунке 1.9. Количество интервалов разбиения гистограммы отредактировано вручную в соответствии с правилом Старджесса: $l = 1 + 3.3 \cdot \lg 100 = 7.6 \approx 8$.

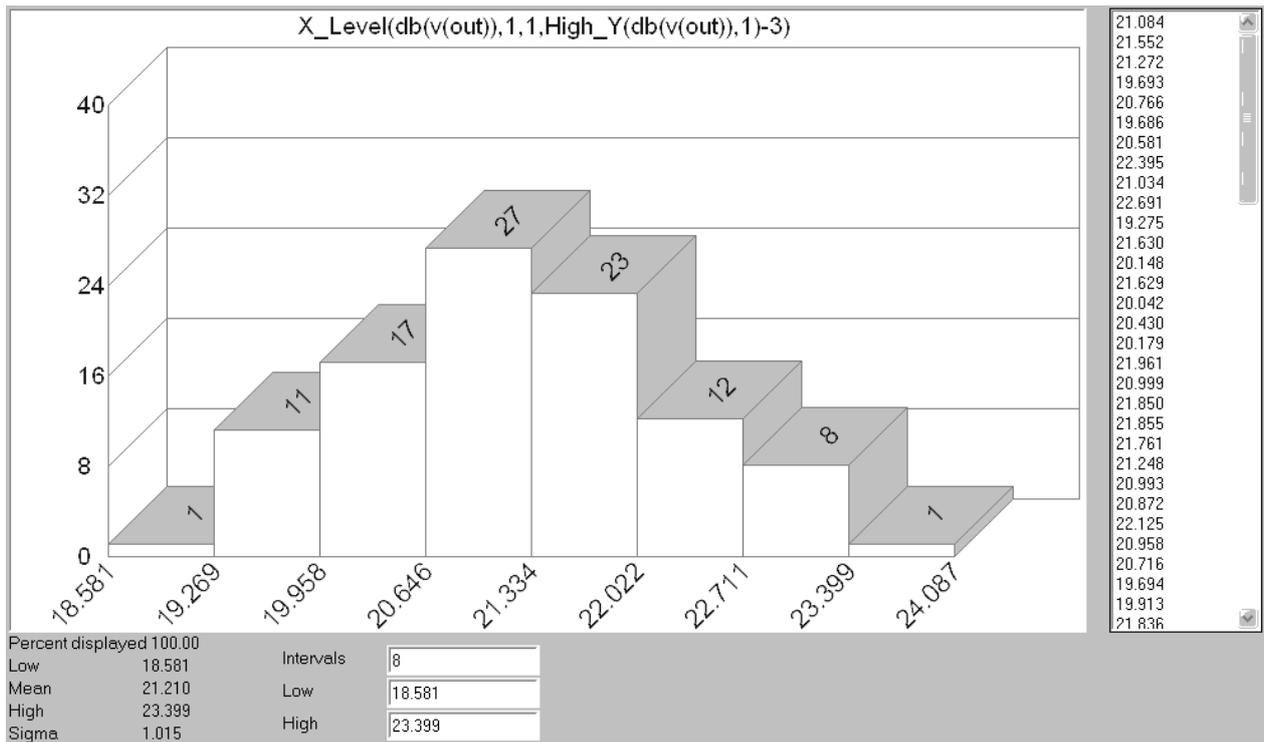


Рисунок 1.9 – Гистограмма распределения верхней частоты ФНЧ

Сравнительный анализ результатов исследования в MathCAD и Micro-CAP позволяет сделать выводы:

1. Полученные гистограммы близки к теоретическому виду кривой плотности нормального распределения.
2. Соответствующие статистические оценки согласуются между собой, что говорит об адекватности проведенного исследования (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Числовые характеристики статистического ряда распределения

	НАИМЕНЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ	НАИБОЛЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	СРЕДНЕКВАДРАТИЧ ОТКЛОНЕНИЕ
MathCAD	18.986	21.364	23.901	0.891
Micro-CAP	18.581	21.210	23.399	1.015

1.5 Лабораторное задание

Перед началом выполнения лабораторного задания следует убедиться в том, что библиотека математических моделей операционных усилителей подключена (см. прием №1 раздела «Типовые приемы работы в MicroCAP...»).

Перед началом исследования для своего варианта задания по таблице 1 (стр. 35) найти стандартную меру отклонения σ_d при известном уровне доверительной вероятности P .

Для вариантов 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25. Повторить методический пример, приведенный выше, по исходным данным Вашего варианта. Построить гистограммы распределения случайных величин с количеством интервалов разбиения 8, 9, 10, 11. Сравнить их внешний вид; по результатам сравнения выбрать и включить в отчет вариант наиболее близкий к виду теоретической кривой плотности нормального распределения.

Для вариантов 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24. Получить распределение *нижней* частоты полосы пропускания фильтра высоких частот (ФВЧ). Построить гистограммы распределения случайных величин с количеством интервалов разбиения 8, 9, 10, 11. Сравнить их внешний вид; по результатам сравнения выбрать и включить в отчет вариант наиболее близкий к виду теоретической кривой плотности нормального распределения. Найти числовые характеристики статистического ряда по аналогии с методическим примером п. 1.4. Количество расчетных точек частотной передаточной характеристики – 2000. Передаточная характеристика ФВЧ:

$$W_{OY_OOC}(\omega) = \frac{K_{U_OOC} (\omega_{ч2} p + 1)}{\frac{\omega_{ч2} + K_{u0} T_{ч1} p}{1 + K_{u0}} + 1},$$

где $K_{U_OOC} = \frac{K_{U0}}{1 + K_{U0}}$; $T_{ч1} = R_{OC2} C_{OC}$; $T_{ч2} = (R_{OC1} + R_{OC2}) C_{OC}$.

Критерием правильности проведенного исследования является совпадение соответствующих числовых характеристик, полученных в MathCAD и MicroCAP. Гистограммы распределения случайных величин также должны совпадать.

1.6 Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное различие метода статистического анализа на ЭВМ и экспериментального статистического метода?
2. Каковы недостатки аналитического вероятностного метода исследования?
3. Почему возрастает объем исходной информации в случае статистического анализа интегральных схем РЭА?
4. Какие процедуры включает в себя схема вычислений при использовании метода Монте-Карло?
5. Что такое тяжелый режим работы ЭРЭ?
6. Каково должно быть количество необходимых испытаний по методу Монте-Карло?
7. Каковы погрешности оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения при использовании метода Монте-Карло?
8. В чем заключается сложность алгоритма выработки псевдослучайных значений параметров ЭРЭ x_i ?

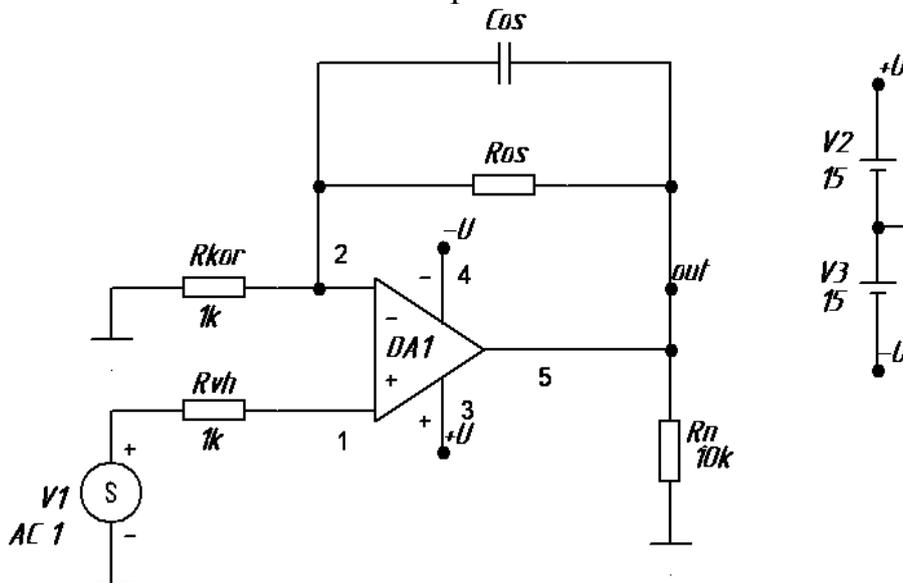
1.7 Варианты заданий

Во всех вариантах задания одинаковыми являются следующие данные:

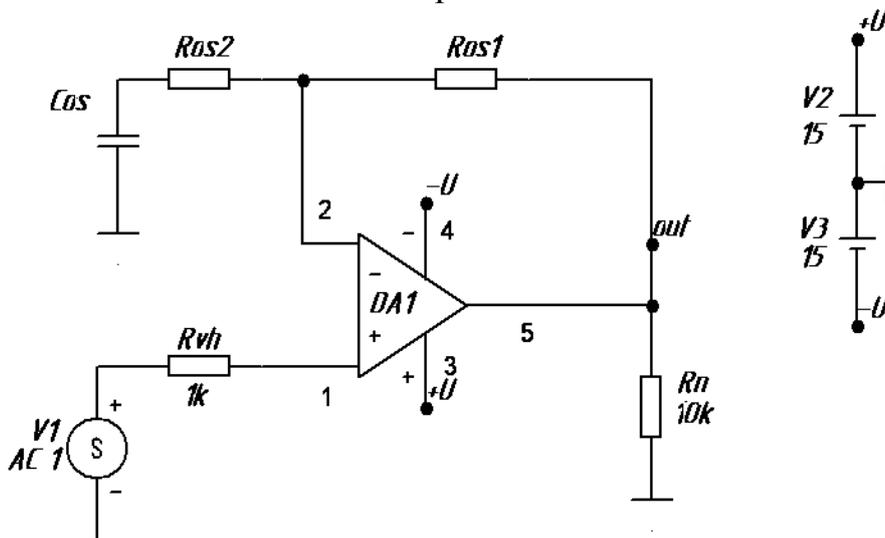
- модель операционного усилителя 140UD8;
- напряжение питания ОУ $\pm 15\text{В}$;
- коэффициент усиления ОУ $K_{U0} = 10^6$;
- нормальный закон распределения случайных величин;
- отсутствие корреляционной связи между параметрами ЭРЭ;
- количество реализаций по методу Монте-Карло равно 100;
- верхняя или нижняя частота измеряется по уровню -3дБ .

Типовые схемы

Тип I – Фильтр низких частот



Тип II – Фильтр высоких частот



Варианты заданий

№ ВАР ИАН ТА	ТИПО ВАЯ СХЕМ А	НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭРЭ, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ СЛУЧАЙНЫЙ РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ	ВЕЛИЧИНА РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ЭРЭ δ	ДОВЕРИТЕ ЛЬНАЯ ВЕРОЯТНО СТЬ
1	I	$R_{OC}=10КОМ;$ $C_{OC}=15НФ$	5%	99%
2	II	$R_{OC1}=100КОМ;$ $R_{OC2}=10КОМ;$ $C_{OC}=15НФ$	3%	95%
3	I	$R_{OC}=50КОМ;$ $C_{OC}=5НФ$	15%	99.9%
4	II	$R_{OC1}=75КОМ;$ $R_{OC2}=10КОМ;$ $C_{OC}=25НФ$	10%	95.5%
5	I	$R_{OC}=150КОМ;$ $C_{OC}=10НФ$	20%	99.7%
6	II	$R_{OC1}=15КОМ;$ $R_{OC2}=1КОМ;$ $C_{OC}=50НФ$	20%	99%
7	I	$R_{OC}=75КОМ;$ $C_{OC}=1НФ$	3%	95.5%
8	II	$R_{OC1}=20КОМ;$ $R_{OC2}=15КОМ;$ $C_{OC}=30НФ$	15%	99.7%
9	I	$R_{OC}=35КОМ;$ $C_{OC}=55НФ$	5%	95.5%
10	II	$R_{OC1}=10КОМ;$ $R_{OC2}=10КОМ;$ $C_{OC}=20НФ$	10%	99.7%
11	I	$R_{OC}=5КОМ;$ $C_{OC}=40НФ$	3%	99.0%

12	II	$R_{OC1}=60\text{КОМ};$ $R_{OC2}=25\text{КОМ};$ $C_{OC}=2\text{НФ}$	15%	99.9%
13	I	$R_{OC}=100\text{КОМ};$ $C_{OC}=10\text{НФ}$	20%	95%
14	II	$R_{OC1}=100\text{КОМ};$ $R_{OC2}=25\text{КОМ};$ $C_{OC}=10\text{НФ}$	3%	99.7%
15	I	$R_{OC}=25\text{КОМ};$ $C_{OC}=25\text{НФ}$	10%	95.5%
16	II	$R_{OC1}=120\text{КОМ};$ $R_{OC2}=80\text{КОМ};$ $C_{OC}=25\text{НФ}$	15%	99.9%
17	I	$R_{OC}=120\text{КОМ};$ $C_{OC}=5\text{НФ}$	10%	99.7%
18	II	$R_{OC1}=80\text{КОМ};$ $R_{OC2}=30\text{КОМ};$ $C_{OC}=5\text{НФ}$	5%	95.5%
№ ВАР ИАН ТА	ТИПО ВАЯ СХЕМ А	НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭРЭ, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ СЛУЧАЙНЫЙ РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ	ВЕЛИЧИНА РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ЭРЭ δ	ДОВЕРИТЕ ЛЬНАЯ ВЕРОЯТНО СТЬ
19	I	$R_{OC}=80\text{КОМ};$ $C_{OC}=60\text{НФ}$	3%	99.9%
20	II	$R_{OC1}=70\text{КОМ};$ $R_{OC2}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=60\text{НФ}$	10%	95%
21	I	$R_{OC}=30\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	15%	99%
22	II	$R_{OC1}=100\text{КОМ};$ $R_{OC2}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	10%	95.5%
23	I	$R_{OC}=70\text{КОМ};$	5%	95%

		$C_{OC}=40H\Phi$		
24	II	$R_{OC1}=100KOM;$ $R_{OC2}=80KOM;$ $C_{OC}=20H\Phi$	3%	99.7%
25	I	$R_{OC}=15KOM;$ $C_{OC}=20H\Phi$	15%	99.9%

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 – ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 Цель работы

В ходе выполнения настоящей работы предусматривается:

- 1) изучение методики проведения полного факторного эксперимента;
- 2) приобретение навыков построения различных полиномиальных моделей применительно к исследуемой технической системе;
- 3) знакомство со способами автоматизации математических расчетов при обработке результатов экспериментальных данных.

2.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания к лабораторной работе.
2. Письменно, в отчете по лабораторной работе ответить на контрольные вопросы.
3. Внимательно ознакомиться с методическим примером, приведенным в пункте 2.4.
4. Выполнить лабораторное задание согласно варианту задания.
5. Сделать выводы по работе.

Внимание! Отчет по лабораторной работе в обязательном порядке должен содержать: схемы включения, графики зависимостей, все необходимые расчеты и их результаты, текстовые пояснения. На графиках в отчете должны присутствовать единицы измерения, масштаб, цена деления.

Отчет по лабораторной работе целесообразно выполнять на двойных тетрадных листках с целью облегчения построения графиков.

2.3 Основные понятия планирования эксперимента

В технике часто встречается следующая задача. Имеется k переменных x_i ($i = 1, \dots, k$) и зависящая от них величина y . Сами переменные могут быть случайными величинами, так как их значения заданы. Однако на величину y влияют и другие, не поддающиеся точному контролю переменные, поэтому величина y носит случайный характер. Для этих условий необходимы методы экспериментального определения влияния переменных на величину y .

На математическом языке задача формулируется следующим образом: нужно получить некоторое представление о функции отклика:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (2.1)$$

где η – параметр процесса, подлежащий оптимизации; x_i ($i = 1, \dots, k$) – независимые переменные, которые можно изменять при постановке экспериментов.

Рассмотрим самый общий случай, когда исследование поверхности отклика ведется при неполном знании механизма изучаемых явлений. Естественно, что в этом случае аналитическое выражение функции отклика неизвестно. Поэтому приходится ограничивать представление функции отклика полиномом:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (2.2)$$

где $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – теоретические коэффициентами регрессии.

В результате эксперимента получают коэффициенты b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} , которые являются оценками теоретических коэффициентов. После этого уравнение (2.2) принимает вид:

$$\hat{\eta} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < l}^k b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (2.3)$$

где $\hat{\eta}$ – расчетное значение параметра оптимизации (y – выборочная оценка для η).

Из формулы (2.3) видно, что планирование эксперимента связано с новым для экспериментатора языком алгебраических (полиномиальных) моделей. Но прежде, чем приступить к проведению эксперимента, основной целью которого является построение математической модели в виде уравнения (2.3), необходимо последовательно решить следующие задачи: выбрать критерий (или критерии) оптимизации y ; выбрать независимые переменные x_i -факторы; вычислить коэффициенты регрессии b_i ; определить вид функции отклика и планирования.

Критерий оптимизации. Выбирая критерий оптимизации y в математической модели (2.3), необходимо учитывать многие соображения. Критерий оптимизации желательно иметь таким, чтобы он однозначно и с достаточной полнотой характеризовал эффективность объекта исследования. Следует стремиться к тому, чтобы критерий был только один, мог оцениваться количественно с максимальной статистической эффективностью и имел ясный физический смысл. Иногда критерий оптимизации приходится изменять из-за технических трудностей, например в связи с отсутствием необходимых приборов, достоверных методов оценки. В этих условиях можно применять критерии, дающие косвенную оценку, тогда поиск экстремума становится интуитивным, и усложняется интерпретация результатов. Не рекомендуется выбирать в качестве критерия оптимизации параметры, которые нельзя измерять, например выражаемые в процентах, в логарифмических и тригонометрических функциях и т.д.

Когда имеется несколько критериев оптимизации, следует рассмотреть возможность уменьшения их числа до минимума. Если не удастся уменьшить число критериев до одного, то при проведении исследований нужно решить компромиссные задачи или провести переформулировку задачи, заменив задачу с несколькими критериями оптимизации последовательными задачами с меньшим числом критериев в каждой. Критерий оптимизации, выбранный на стадии предварительного изучения объекта исследования, можно заменить другими в процессе экспериментальной работы.

Критерий (или параметр) оптимизации – это реакция (отклик) на воздействия факторов, которые определяют поведение изучаемой системы. Параметры оптимизации в технических системах могут быть экономическими, технико-экономическими, статистическими, психологическими, тактико-техническими и т.д. Параметр оптимизации должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Быть количественным и задаваться одним числом; допускать измерение при любой возможной комбинации выбранных уровней факторов (множество значений, которые принимает параметр оптимизации, называется областью его определения);

2. Быть универсальным, т.е. всесторонне характеризовать объект исследования;

3. Иметь простой физический смысл;

4. Существовать для всех стадий проведения эксперимента; быть эффективным – это требование сводится к выбору параметра оптимизации для технической системы, который определяется с наибольшей возможной точностью, наглядностью результатов, удобством пользования, однозначностью и т.д.

После выбора критериев оптимизации выбирают управляемые факторы – переменные, воздействие которых на объект исследования можно изменять целенаправленно.

Независимые переменные (факторы). После того как выбраны объект исследования и параметры оптимизации, необходимо включить в рассмотрение все существующие факторы, которые могут оказывать воздействия на исследуемый объект. Число выбранных факторов обуславливает размерность изучаемого факторного пространства. Факторы определяют сам объект исследования или его состояние. Выбирая факторы, целесообразно учитывать область, ограничивающую их возможное варьирование, а также размерность факторов, так как при движении в область оптимума планирование эксперимента обычно не инвариантно к размерности факторов. Желательно, чтобы факторы имели количественную оценку, хотя планирование эксперимента возможно, если некоторые факторы представлены качественно. Важным требованием, предъявляемым к управляемым факторам, является отсутствие их взаимозаменяемости. Можно сформулировать следующие требования к факторам:

1. Независимость, т.е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Если это условие невыполнимо, то планировать эксперимент невозможно.

2. Совместимость. При планировании эксперимента обычно одновременно изменяется несколько факторов. Поэтому очень важно сформулировать требования, которые предъявляются к совокупности факторов. Совместимость факторов означает, что все их комбинации осуществимы и безопасны.

3. Управляемость. Это значит, что экспериментатор, выбрав нужное значение фактора, может его поддерживать постоянным в течение всего опыта, т.е. может управлять фактором. Планировать эксперимент можно в том случае, если уровни факторов подчиняются воле экспериментатора.

4. Точность замера. Степень точности определяется диапазоном изменения факторов. Если факторы измеряют с большой ошибкой или особенность объекта исследования такова, что значения факторов трудно поддерживать на заданном уровне (уровень фактора «плышет»), то экспериментатору следует обратиться к другим методам исследования объекта.

5. Однозначность, т.е. непосредственное воздействие факторов на объект. Трудно управлять фактором, который является функцией других факторов. Но в планировании могут участвовать и сложные факторы, состоящие из нескольких простых факторов. Необходимость введения сложных факторов возникает при необходимости предоставления динамических особенностей объекта в статистической форме.

Степень точности математической модели определяется диапазоном изменения факторов. В результате предварительной работы для каждого i -го фактора устанавливаются следующие значения: x_{i0} – основной уровень фактора; $x_{i\max}$, $x_{i\min}$ – верхний и нижний уровни i -го фактора, принимаемые во время опытов; Δx_i – интервал варьирования (изменения).

При проведении экспериментов используются кодированные значения уровней факторов. При этом основной уровень принимается равным нулю, верхний кодируется как $+1$, а нижний кодируется как -1 . Кодирование осуществляется по формуле:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad i = 1, \dots, k.$$

Число всех точек факторного пространства при двухуровневой системе изменения факторов, в которых экспериментально необходимо определить значение функции отклика, равно 2^k , где k – число факторов.

Определение коэффициента регрессии. Для определения коэффициентов уравнения регрессии (2.3) экспериментально находят значения величины y в N точках факторного пространства. В общем случае число повторений опытов в точках факторного пространства может быть различным, однако практически это число принимается единым для всего эксперимента. Задача

определения коэффициентов регрессии является типичной для регрессионного анализа. Основы этого анализа, применительно к планированию эксперимента, заключаются в следующем:

1. Результаты измерения y_1, y_2, \dots, y_N величины y в N точках факторного пространства представляют собой реализацию нормально распределенной случайной величины;

2. Дисперсии реализаций $\sigma^2\{y_i\}$ ($i = 1, \dots, N$) равны между собой, т.е. дисперсия y не зависит от абсолютного значения этой величины;

3. Факторы x_1, x_2, \dots, x_k – независимые величины и измеряются с пренебрежительно малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении значения величины.

Коэффициенты при независимых переменных в аппроксимирующем полиноме указывают на степень влияния факторов. Если коэффициент положительный, то с увеличением фактора возрастает и выходной параметр системы, при отрицательном коэффициенте с возрастанием фактора наблюдается уменьшение величины y . Коэффициент при линейных членах соответствует вкладу данного фактора в значение параметра системы y при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний. Главным эффектом фактора принято называть вклад фактора при переходе от нижнего уровня к верхнему.

Вид функции отклика и планирования. Поскольку истинное описание функции отклика (2.1) установить невозможно, то ее описывают с помощью аппроксимирующего полинома (2.2) с коэффициентами:

$$\beta_i = \frac{\partial \eta(x_1, x_2, \dots, x_k)}{\partial x_i}; \quad \beta_{ij} = \frac{\partial^2 \eta(x_1, x_2, \dots, x_k)}{\partial x_i \partial x_j};$$

$$\beta_{ii} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \eta(x_1, x_2, \dots, x_k)}{\partial x_i^2}.$$

Аппроксимирующий полином (2.2) принимают первой, второй и реже третьей степени, причем порядок его можно менять в зависимости от этапа эксперимента, либо специфики решаемой задачи. Коэффициенты полинома (2.2) из-за отсутствия истинного описания функций (2.1) нельзя определить теоретически. Их определяют экспериментально, проводя опыты при некоторых фиксированных значениях факторов. Экспериментально найденные коэффициенты b_i являются оценками теоретических β_i .

Экспериментальное исследование систем ставит своей задачей изучение влияния факторов системы на выходную величину y . Полином (2.3) позволяет установить воздействие на функцию отклика не только каждого из факторов, но и любой их комбинации при условии, что полином содержит соответствующие этой комбинации члены.

При планировании экспериментов для исследования технических систем вначале проверяют возможность линейной аппроксимации функции от-

клика. В этом случае предполагают, что в полиномах более высокого порядка коэффициенты при нелинейных членах малы по сравнению с главными эффектами ($b_{ij} \rightarrow 0$; $b_{ii} \rightarrow 0$; $b_{ijl} \rightarrow 0$), и модель функции отклика имеет вид:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i. \quad (2.4)$$

Главный эффект может оказаться смешанным с одним или несколькими взаимодействиями высшего порядка, поэтому в этом случае не ясно, следует считать полученный эффект равным главному эффекту, эффекту взаимодействия или их комбинации. Если существуют главные эффекты и их парные взаимодействия, т.е. коэффициенты $b_i \neq 0$; $b_{ij} \neq 0$; $b_{ii} \rightarrow 0$ и $b_{ijl} \rightarrow 0$, тогда полином (2.3) преобразуется к виду:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (2.5)$$

Может оказаться, что на параметр оптимизации значительное влияние оказывают члены, в которых коэффициенты типа b_{ii} тоже не равны нулю. В этом случае получим новую модель функции отклика:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2. \quad (2.6)$$

Для случая, когда коэффициенты при тройных взаимодействиях не равны нулю $b_{ijl} \neq 0$, уравнение регрессии можно представить в виде полинома (2.3).

Таким образом, оперируя в процессе проведения планирования эксперимента одними и теми же переменными x_i , можно получать различные функции откликов. Поэтому вопрос построения планов и получения математической модели, тождественной (адекватной) изучаемому объекту исследования, является важным в теории планирования эксперимента.

Факторный эксперимент связан с варьированием одновременно всех факторов и проверкой достоверности результатов математико-статистическими методами. Факторы в эксперименте можно варьировать на бесконечном множестве уровней. При планировании эксперимента, чтобы получить результаты эксперимента в виде удобных для анализа полиномов, достаточно изменять факторы на двух, трех или пяти уровнях. Проведение экспериментов со многоуровневыми факторами затруднительно, поэтому они находят ограниченное применение в практике инженерного эксперимента.

Если в эксперименте при двухуровневой системе измерений факторов реализуются все возможные сочетания уровней факторов, т.е. $N = 2^k$, то такой эксперимент называется полным факторным экспериментом (ПФЭ) или планом. ПФЭ удобно представить в виде матрицы планирования. Матрица планирования для трехфакторного эксперимента при кодированных значениях уровней факторов показана в таблице 2.1.

Столбцы матрицы ПФЭ обладают одним из важнейших для планирования эксперимента свойств – ортогональностью. Для полного понимания смысла этого термина необходимо иметь минимальные представления о матрицах и матричной алгебре.

Как видно из матрицы (таблица 2.1), условие ортогональности выполняется для всех восьми столбцов: $x_0, x_1, x_2, x_3, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$. Произведение первого столбца (x_0) с остальными дает простое повторение этих столбцов. Столбец с фактором x_0 вводится для определения свободного члена уравнения (2.3). Ортогональность столбцов матрицы планирования позволяет определять коэффициенты регрессии по довольно простой формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_i}{N}. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1 - Матрица планирования для трехфакторного эксперимента

НОМЕР ОПЫТА	ФАКТОРЫ				ПРОИЗВЕДЕНИЕ ФАКТОРОВ				ПАРАМЕТР ОПТИМИЗАЦИИ \bar{y}
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y_1
2	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y_2
3	1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y_3
4	1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y_4
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_5
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_6
7	1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_7
8	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_8

Полные факторные планы обладают рядом важных для планирования эксперимента свойств, основными из которых являются следующие:

1. Симметричность относительно центра эксперимента, означающая, что алгебраическая сумма элементов вектор-столбца каждого фактора равна нулю, т.е.:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0; \quad i = 1, \dots, k,$$

где i – номер фактора; N – число опытов;

2. Условие нормировки, при котором сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов, или:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N; \quad i = 1, \dots, k;$$

3. Ортогональность, характеризующая свойство совокупности столбцов матрицы: сумма почленных произведений любых двух вектор-столбцов равна нулю, т.е.:

$$\sum_{u=1}^N a_{iu} x_{ju} = 0; \quad i \neq j; \quad i, j = 1, \dots, k;$$

4. Ротатабельность, означающая, что точность предсказания значения функции отклика одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента, точки эксперимента лежат на поверхности сферы, центром которой является точка основного уровня.

Полные факторные планы позволяют выявить влияние на функцию отклика y не только каждого фактора в отдельности, но и совместное влияние их комбинаций, т.е. исследовать так называемый эффект взаимодействия. При определении коэффициентов уравнения регрессии (2.7) экспериментально находят значения y в N точках факторного пространства.

Планируя эксперимент, на первом этапе всегда стремятся получить линейную модель. Однако нет гарантии, что в выбранных интервалах варьирования процесс описывается линейной моделью. И модель типа $y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots$ не всегда можно получить. На практике приходится прибегать к более сложным зависимостям.

ПФЭ позволяет количественно оценить эффекты взаимодействия. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов. При вычислении коэффициента, соответствующего эффекту взаимодействия, с новым вектор-столбцом можно обращаться так же, как с вектор-столбцом любого фактора. Очень важно, что при добавлении столбцов эффектов взаимодействий все рассмотренные свойства матриц планирования сохраняются. Модель для ПФЭ типа 2^3 выглядит следующим образом:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

В столбцах x_1, x_2, x_3 (см. таблицу 2.1) задают планирование – по ним непосредственно определяются условия опытов, а остальные столбцы $x_0, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$ служат только для расчета.

Если производят планирование на γ уровнях для факторов, то ПФЭ, т.е. эксперимент, исчерпывающий все возможные сочетания факторов, обозначают γ^k .

Если же экспериментальные данные не согласуются с полиномами вида (2.4) и (2.5), то исследуемый процесс стремятся описать поверхностью второго порядка (2.6). Используя концепцию факторного пространства, можно до-

полнить двухуровневый план ПФЭ определенными (звездными) точками (рисунок 2.1).

Такие планы называются центральными, композиционными (ЦКП). Различают ортогональные (почти ортогональные) и ротатабельные ЦКП.

Большим преимуществом этих планов является то, что их можно получать из планов 2^n . Для этого к реализованному плану линейного полинома добавляют опыты в промежуточных «звездных» точках и в центре плана. Полученную при этом «композицию» используют для математического описания процесса в виде многочлена второй степени (2.6).

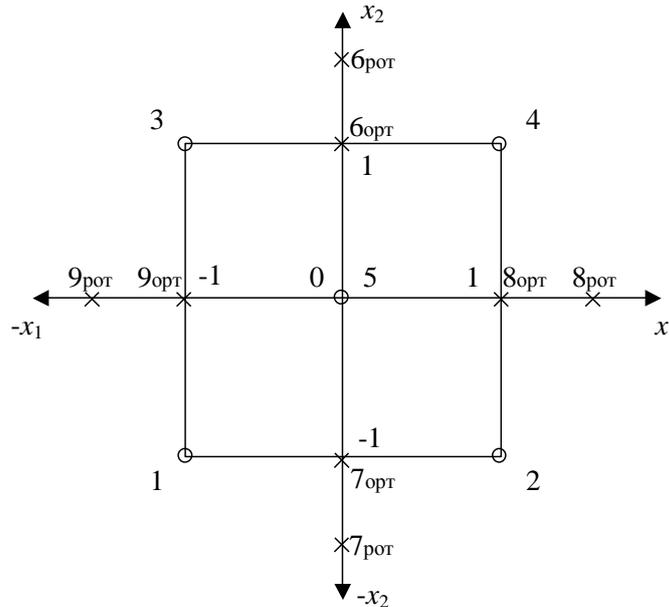


Рисунок 2.1 – Планы для функций $y = f(x_1, x_2)$

2.4 Пример факторного эксперимента в исследовании активного фильтра низких частот

Необходимо исследовать изменение верхней частоты полосы пропускания активного фильтра низких частот в зависимости от сопротивления и емкости частотно-задающей цепи. Типовая схема ФНЧ представлена на рисунке 2.2, из которого видно, что частотно-задающая цепь образована ЭРЭ $R_{OC}C_{OC}$.

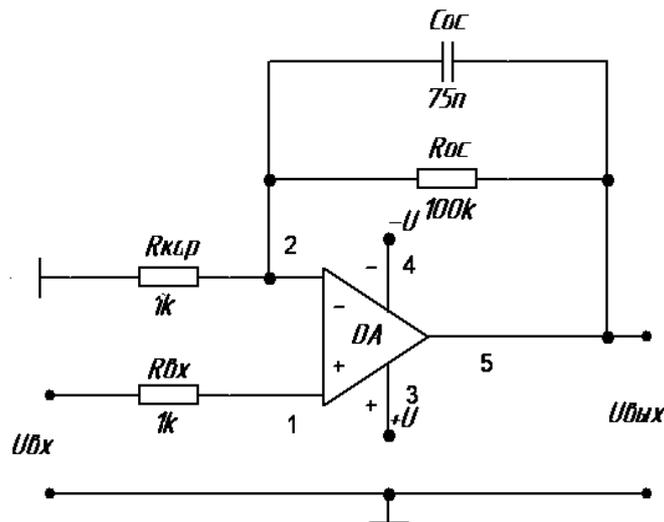


Рисунок 2.2 – Типовая схема активного ФНЧ

Величины сопротивления и емкости ЭРЭ варьируются в пределах $\pm 10\%$ от номинальных значений. Полоса пропускания ФНЧ лежит в диапазоне от 0 Гц до значения верхней частоты F_B : $[0; F_B]$. Верхняя частота полосы пропускания определяется по уровню -3 дБ от максимального значения коэффициента передачи фильтра K_U .

Требуется провести полный факторный эксперимент с целью установления, какая из двух полиномиальных моделей (2.4) или (2.5) наиболее адекватно описывает функциональную зависимость $F_B = f(R_{OC}, C_{OC})$.

1. Предварительный этап

Критерий оптимизации – верхняя частота полосы пропускания F_B активного ФНЧ. Единица измерения – Герц.

Независимые переменные (факторы) – сопротивление и емкость ЭРЭ R_{OC} и C_{OC} , образующие частотно-задающую цепь ФНЧ. Единицы измерения – килоом и нанофарад, соответственно. Предполагается, что в эксперименте участвуют R_{OC} и C_{OC} в дискретном исполнении, поэтому корреляционной связи между их параметрами не существует. Количество факторов $k = 2$. Число опытов в матрице планирования $N = 2^k = 4$.

Номинальные значения независимых переменных: $R_{OC} = 100$ кОм; $C_{OC} = 75$ нФ. Интервалы варьирования: $\Delta R_{OC} = \pm 10$ кОм; $\Delta C_{OC} = \pm 7.5$ нФ.

Кодированная запись факторов:

$$x_1 = \frac{z_1 - 100}{10} \text{ для } R_{OC}; \quad x_2 = \frac{z_2 - 75}{7.5} \text{ для } C_{OC}.$$

Основные характеристики плана эксперимента приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики плана эксперимента

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ ФАКТОРА Z_1	КОДОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ФАКТОРА X_1	ЗНАЧЕНИЕ ФАКТОРА Z_2	КОДОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ФАКТОРА X_2
ОСНОВНОЙ УРОВЕНЬ, Z_{0I}	100	0	75	0
ИНТЕРВАЛ ВАРЬИРОВАНИЯ, ΔZ_I	10	---	7.5	---
ВЕРХНИЙ УРОВЕНЬ, $Z_{I\text{MAX}}$	110	1	82.5	1
НИЖНИЙ УРОВЕНЬ, $Z_{I\text{MIN}}$	90	-1	67.5	-1

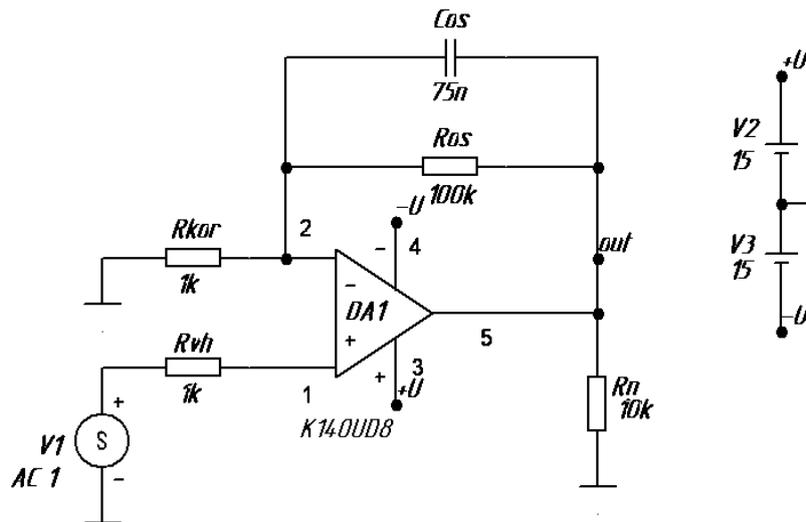
2. Реализация вычислительного эксперимента

Для ведения эксперимента применяют план 2^2 (ПФЭ), составляют рабочую таблицу планирования (таблица 2.3) и в соответствии с ней проводят эксперимент, результаты которого записывают в столбец экспериментальных значений выходного параметра y_{Σ} . Столбцы y_T и Δy^2 заполняются на последующих этапах.

Таблица 2.3 – Матрица планирования эксперимента

НОМЕР ОПЫТА	X_0	X_1	X_2	Z_1	Z_2	y_{Σ}	y_T	Δy^2
1	+1	-1	-1	90	67.5	26.150	25.934	0.046
2	+1	-1	+1	90	82.5	21.415	21.630	0.046
3	+1	+1	-1	110	67.5	21.412	21.627	0.046
4	+1	+1	+1	110	82.5	17.539	17.323	0.046
							$\Sigma \Delta y^2$ =	0.186

Вычислительный факторный эксперимент выполнен с помощью программы MicroCAP. Типовая схема активного ФНЧ, подготовленная в MicroCAP, изображена на рисунке 2.3.



**Рисунок 2.3 – Типовая схема ФНЧ,
подготовленная для моделирования в MicroCAP**

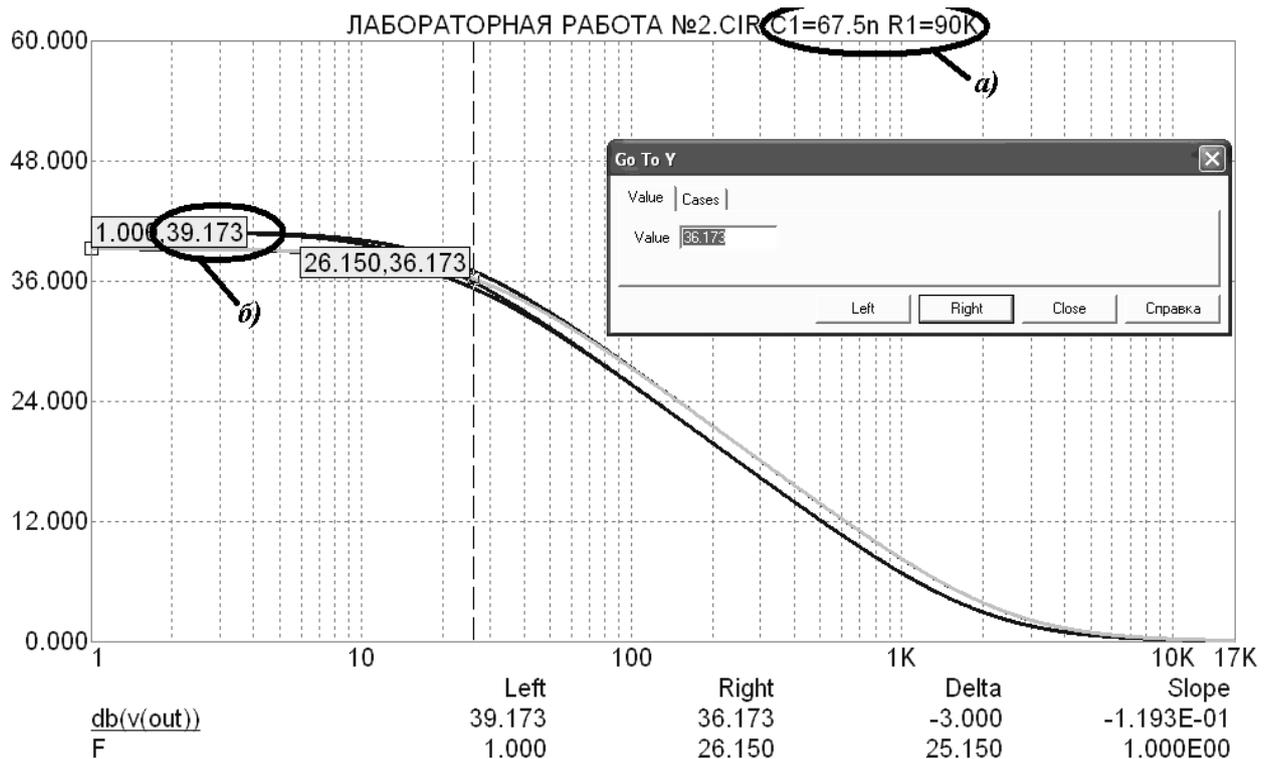
Технические приемы по подключению математической модели ОУ, прокладке скрытых цепей питания и именованию цепей были отработаны нами при выполнении лабораторной работы №1. *Разброс параметров ЭРЭ в настоящем примере указывать не требуется.*

Задание параметров моделирования в частотной области проводится в два этапа. Первый этап аналогичен описанному в примере лабораторной работы №1 – это работа с диалоговым окном **AC Analysis Limits**. Второй этап начинается с нажатия на кнопку **Stepping** в диалоговом окне **AC Analysis Limits**. В появившемся диалоговом окне **Stepping** последовательно указывают:

- на вкладке **1** в выпадающем списке **Step What** выбирают **Ros** (резистор частотно-задающей цепи);
- в группе **Step It** выбирают значение **Yes**;
- в группе **Method** выбирают значение **List**;
- в группе **Change** выбирают параметр **Step variables in nested loops**;
- в появившейся строке ввода **List** указывают два уровня варьирования для ПФЭ **90k,110k**.

Аналогично поступают со вкладкой **2**, где в списке **Step What** выбирают **Cos** (конденсатор частотно-задающей цепи). В строке ввода **List** указывают **67.5n,82.5n**.

В результате будет иметь место вариация номиналов резистора и конденсатора во вложенных циклах. Фактически это соответствует комбинации уровней факторов x_1 и x_2 в матрице планирования (таблица 2.3). На рисунке 2.4 представлено семейство АЧХ, полученное после реализации вычислительного факторного эксперимента.



а) – текущая комбинация параметров; б) – коэффициент передачи на постоянном токе для выбранной комбинации

Рисунок 2.4 – Семейство АЧХ фильтра

Выходной параметр в факторном эксперименте – верхняя частота полосы пропускания F_B . Для точного нахождения этой величины по графикам выполняют следующие действия:

а) нажатием на пиктограмму  на панели инструментов переходят в режим электронного курсора.

б) клавишами \uparrow или \downarrow выбирают нужную комбинацию параметров в соответствии с матрицей планирования (таблица 2.3). Контроль текущей комбинации параметров ведут по строке заголовка (см. рисунок 2.4).

с) нажатием на пиктограмму  вызывают диалоговое окно **Go To Y**. В строке ввода **Value** одноименной вкладки указывают значение, *меньшее на 3 единицы, чем коэффициент передачи фильтра на постоянном токе*. Изначально, при переходе в режим электронного курсора, левый маркер отображает коэффициент передачи на постоянном токе (см. рисунок 2.4). Работу с диалоговым окном завершают нажатием на кнопку **Right**.

д) правый электронный курсор перемещается в искомую точку, при этом значение абсциссы X соответствует верхней частоте F_B . Результат заносят в столбец u_2 таблицы 2.3.

е) закрывают диалоговое окно **Go To Y** и возвращаются к пункту б) данного алгоритма.

3. Вычисление коэффициентов линейного полинома $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$.

Расчет коэффициентов регрессии по формуле (2.7) дал следующие результаты:

$$a_0 = \frac{26.150 + 21.415 + 21.412 + 17.539}{4} = 21.629;$$

$$a_1 = \frac{-26.150 - 21.415 + 21.412 + 17.539}{4} = -2.153;$$

$$a_2 = \frac{-26.150 + 21.415 - 21.412 + 17.539}{4} = -2.152.$$

Следовательно, линейный полином имеет вид:

$$y = 21.629 - 2.153x_1 - 2.152x_2.$$

4. Проверка возможности линейного полинома.

С помощью полученного линейного полинома вычисляют теоретическое значение выходного параметра y_T в каждом опыте, результаты заносят в предпоследний столбец y_T таблицы 2.3:

$$y_{T1} = 21.629 - 2.153 \cdot (-1) - 2.152 \cdot (-1) = 25.934;$$

$$y_{T2} = 21.629 - 2.153 \cdot (-1) - 2.152 \cdot 1 = 21.630;$$

$$y_{T3} = 21.629 - 2.153 \cdot 1 - 2.152 \cdot (-1) = 21.627;$$

$$y_{T4} = 21.629 - 2.153 \cdot 1 - 2.152 \cdot 1 = 17.323.$$

Последний столбец Δy^2 таблицы 2.3 содержит значения квадратов разности между экспериментальным и теоретическим значениями выходного параметра. Итоговая сумма квадратов разности значений для линейного полинома составляет 0.186.

5. Дополнение к базовой матрице планирования.

Для проверки возможности нелинейного полинома следует сделать дополнение к базовой матрице планирования. Помимо столбцов x_1 и x_2 , вводится столбец произведения двух факторов x_1x_2 , учитывающий эффект взаимодействия (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Дополненная матрица планирования эксперимента

НОМЕР ОПЫТА	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Z_1	Z_2	$Y_{\text{Э}}$	Y_T	ΔY^2
1	+1	-1	-1	+1	90	67.5	26.150	26.150	0
2	+1	-1	+1	-1	90	82.5	21.415	21.415	0
3	+1	+1	-1	-1	110	67.5	21.412	21.412	0
4	+1	+1	+1	+1	110	82.5	17.539	17.539	0
								$\Sigma \Delta Y^2 =$	0

Как уже было отмечено в пункте 2.3, при добавлении столбцов эффектов взаимодействий все свойства матрицы планирования сохраняются. Таким образом, проводить повторно вычислительный эксперимент не требуется – значения выходного параметра y_{Σ} автоматически переносятся из таблицы 2.3.

6. Вычисление коэффициента взаимодействия нелинейного полинома $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$.

Расчет коэффициента взаимодействия a_{12} выполняют по формуле (2.7):

$$a_{12} = \frac{26.150 - 21.415 - 21.412 + 17.539}{4} = 0.216.$$

Следовательно, нелинейный полином имеет вид:

$$y = 21.629 - 2.153x_1 - 2.152x_2 + 0.216x_1x_2.$$

7. Проверка возможности нелинейного полинома.

По аналогии с этапом №4 вычисляют теоретические значения y_T выходного параметра:

$$y_{T1} = 21.629 - 2.153 \cdot (-1) - 2.152 \cdot (-1) + 0.216 \cdot 1 = 26.150;$$

$$y_{T2} = 21.629 - 2.153 \cdot (-1) - 2.152 \cdot 1 + 0.216 \cdot (-1) = 21.415;$$

$$y_{T3} = 21.629 - 2.153 \cdot 1 - 2.152 \cdot (-1) + 0.216 \cdot (-1) = 21.412;$$

$$y_{T4} = 21.629 - 2.153 \cdot 1 - 2.152 \cdot 1 + 0.216 \cdot 1 = 17.539.$$

Сравнительный анализ суммы квадратов в таблицах 2.3 и 2.4 позволяет сделать вывод, что нелинейная полиномиальная модель является более адекватной. Фактически, такая полиномиальная модель аналитически точно выражает функциональную зависимость $F_B = f(R_{OC}, C_{OC})$.

Полученный нелинейный полином можно представить в натуральных значениях факторов z_1 и z_2 :

$$\begin{aligned} F_B &= 21.629 - 2.153 \left(\frac{z_1 - 100}{10} \right) - 2.152 \left(\frac{z_2 - 75}{7.5} \right) + 0.216 \left(\frac{z_1 - 100}{10} \right) \left(\frac{z_2 - 75}{7.5} \right) = \\ &= 86.279 - 0.4313z_1 - 0.5749z_2 + 0.00288z_1z_2. \end{aligned}$$

Ниже приведен листинг программы в MathCAD по расчету коэффициентов регрессии и проверки возможности линейных и нелинейных полиномов.

Для вычисления свободного члена уравнения регрессии используется стандартная функция `mean`. При вычислении коэффициентов регрессии и теоретических значений выходного параметра применяется операция умножения матриц (вводится обычным знаком умножения). Следует помнить, что по правилам математики для умножения матриц необходимо, чтобы число столбцов первой матрицы (вектора) было равно числу строк второй матрицы (вектора).

Количество факторов в эксперименте $m := 2$

Количество опытов в эксперименте $N := 2^m$

Вектор значений выходного параметра - верхняя частота полосы пропускания

$$Y := \begin{pmatrix} 26.150 \\ 21.415 \\ 21.412 \\ 17.539 \end{pmatrix}$$

Матрица планирования для линейного полинома

$$MPL := \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Матрица планирования для нелинейного полинома

$$MPN := \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Свободный член уравнения регрессии - математическое ожидание выходного параметра:

$$b0 := \text{mean}(Y) \quad b0 = 21.629$$

Вычисление коэффициентов регрессии для линейного полинома

$$BL := \frac{Y^T \cdot MPL}{N} \quad BL^T = \begin{pmatrix} -2.153 \\ -2.152 \end{pmatrix}$$

Вычисление коэффициентов регрессии для нелинейного полинома

$$BN := \frac{Y^T \cdot MPN}{N} \quad BN^T = \begin{pmatrix} -2.153 \\ -2.152 \\ 0.216 \end{pmatrix}$$

Вычисление теоретических значений выходного параметра для линейного полинома

$$YTL := b0 + BL \cdot MPL^T \quad YTL := YTL^T \quad YTL = \begin{pmatrix} 25.934 \\ 21.63 \\ 21.627 \\ 17.323 \end{pmatrix}$$

Вычисление суммы квадратов невязок для линейного полинома

$$SKL := (Y - YTL)^2 \quad SKL = \begin{pmatrix} 0.046 \\ 0.046 \\ 0.046 \\ 0.046 \end{pmatrix} \quad \sum SKL = 0.186$$

Вычисление теоретических значений выходного параметра для нелинейного полинома

$$YTN := b_0 + BN \cdot MPN^T \quad YTN := YTN^T \quad YTN = \begin{pmatrix} 26.15 \\ 21.415 \\ 21.412 \\ 17.539 \end{pmatrix}$$

Вычисление суммы квадратов невязок для нелинейного полинома

$$SKN := (Y - YTN)^2 \quad SKN = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \sum SKN = 0$$

Замечание. Традиционно, при проведении физического факторного эксперимента выполняют проверку значимости коэффициентов регрессии и проверку адекватности полиномиальной модели по критерию Фишера [8]. В основе таких проверок лежит понятие дисперсии воспроизводимости, которое характеризует степень разброса измеренных значений при повторных опытах.

Учитывая специфику проведения вычислительного факторного эксперимента на ЭВМ, дисперсия воспроизводимости в таком эксперименте равна нулю. Другими словами, повторные опыты (вычисления) в одной и той же точке факторного пространства всегда дают одинаковый результат. В связи с этим применение традиционных проверок лишено смысла – любой коэффициент регрессии будет являться значимым, любая полиномиальная модель будет являться адекватной.

В настоящем примере предложен альтернативный способ проверки адекватности полиномиальной модели путем сравнения суммы квадратов невязок между экспериментальными и теоретическими значениями для разных полиномов. По существу, такой способ является разновидностью метода аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

2.5 Лабораторное задание

Перед началом выполнения лабораторного задания следует убедиться в том, что библиотека математических моделей операционных усилителей подключена.

Для вариантов 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25. Повторить методический пример, приведенный выше, по исходным данным Вашего варианта.

Для вариантов 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24. Реализовать ПФЭ 2^3 . В качестве варьируемых параметров принять сопротивления резисторов R_{OC1} и R_{OC2} , а также емкость конденсатора C_{OC} . Выходной параметр – нижняя частота полосы пропускания фильтра. В дополненной матрице планирования должны быть введены четыре столбца, учитывающие эффекты взаимодействия: x_1x_2 ; x_1x_3 ; x_2x_3 ; $x_1x_2x_3$. Общий вид нелинейного полинома:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3.$$

2.6 Контрольные вопросы

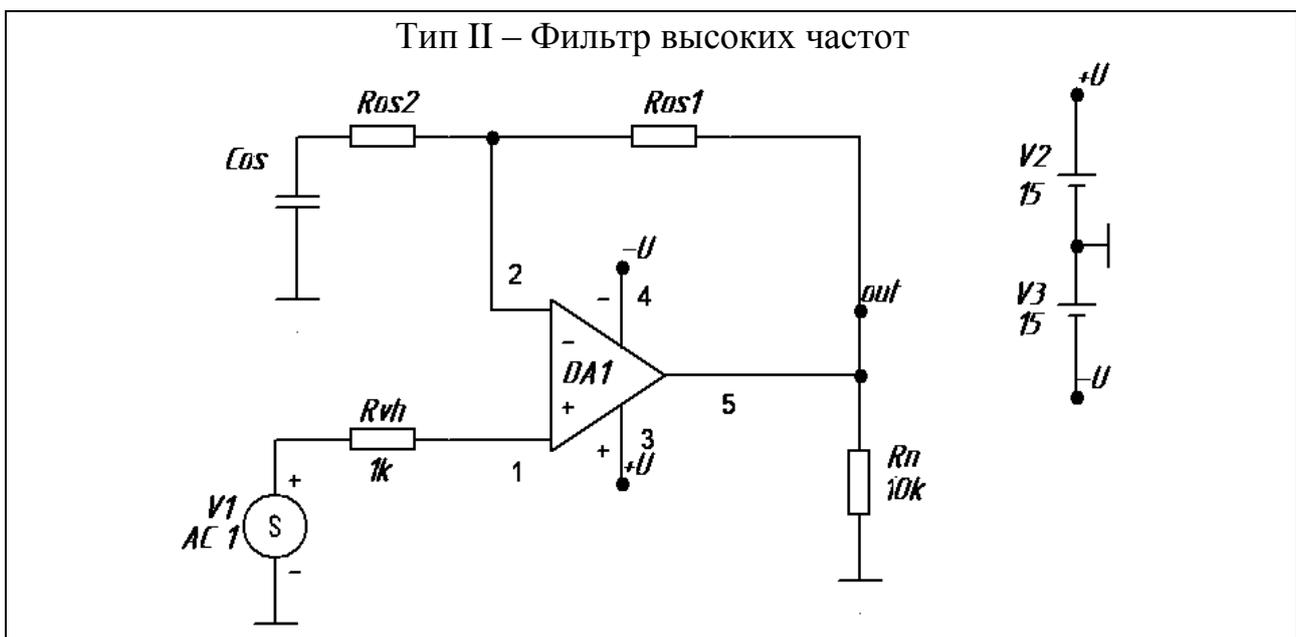
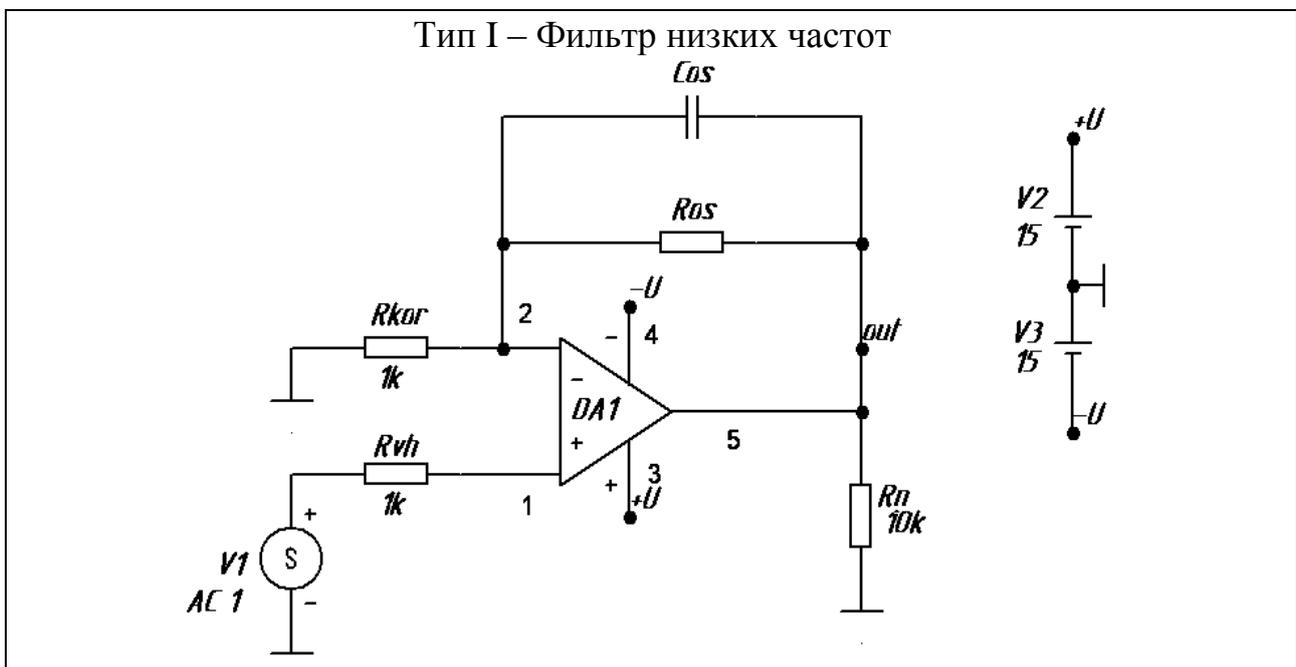
1. Какие задачи необходимо решить, прежде чем приступить к проведению факторного эксперимента?
2. Что такое критерий (или параметр) оптимизации?
3. Каким требованиям должен удовлетворять параметр оптимизации?
4. Какие требования предъявляются к факторам, которые оказывают воздействия на объект исследования во время эксперимента?
5. Каким образом кодируются верхний и нижний уровни факторов в факторном эксперименте?
6. Что такое главный эффект фактора?
7. Какой вид аппроксимации при планировании эксперимента проверяют в первую очередь?
8. Какими свойствами обладают полные факторные планы?

2.7 Варианты заданий

Во всех вариантах задания одинаковыми являются следующие данные:

- модель операционного усилителя 140UD8;
- напряжение питания ОУ $\pm 15\text{В}$;
- отсутствие корреляционной связи между параметрами ЭРЭ;
- верхняя или нижняя частота полосы пропускания измеряется по уровню -3дБ .

Типовые схемы



Варианты заданий

№ ВАР И-АНТ А	ТИПОВАЯ СХЕМА А	НУЛЕВОЙ УРОВЕНЬ ВАРЬИРОВАНИЯ	ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ
1	I	$R_{OC}=10\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 2\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 3\text{НФ}$
2	II	$R_{OC1}=100\text{КОМ};$ $R_{OC2}=10\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 10\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 1\text{КОМ};$ $\Delta C_{OC}=\pm 1.5\text{НФ}$
3	I	$R_{OC}=50\text{КОМ}; C_{OC}=5\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 10\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 1\text{НФ}$
4	II	$R_{OC1}=75\text{КОМ};$ $R_{OC2}=10\text{КОМ};$ $C_{OC}=25\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 15\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 2\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 5\text{НФ}$
5	I	$R_{OC}=150\text{КОМ};$ $C_{OC}=10\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 50\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 2\text{НФ}$
6	II	$R_{OC1}=15\text{КОМ};$ $R_{OC2}=1\text{КОМ};$ $C_{OC}=50\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 5\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 0.3\text{КОМ};$ $\Delta C_{OC}=\pm 15\text{НФ}$
7	I	$R_{OC}=75\text{КОМ}; C_{OC}=1\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 25\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 1\text{НФ}$
8	II	$R_{OC1}=20\text{КОМ};$ $R_{OC2}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=30\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 10\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 7.5\text{КОМ};$ $\Delta C_{OC}=\pm 15\text{НФ}$
9	I	$R_{OC}=35\text{КОМ};$ $C_{OC}=55\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 7\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 11\text{НФ}$
10	II	$R_{OC1}=10\text{КОМ};$ $R_{OC2}=10\text{КОМ};$ $C_{OC}=20\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 1\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 5\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 5\text{НФ}$
11	I	$R_{OC}=5\text{КОМ}; C_{OC}=40\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 0.5\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 4\text{НФ}$
12	II	$R_{OC1}=60\text{КОМ};$ $R_{OC2}=25\text{КОМ};$ $C_{OC}=2\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 20\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 5\text{КОМ};$ $\Delta C_{OC}=\pm 0.2\text{НФ}$
13	I	$R_{OC}=100\text{КОМ};$	$\Delta R_{OC}=\pm 10\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 1\text{НФ}$

		$C_{OC}=10H\Phi$	
14	II	$R_{OC1}=100KOM;$ $R_{OC2}=25KOM;$ $C_{OC}=10H\Phi$	$\Delta R_{OC1}=\pm 10KOM;$ $\Delta R_{OC2}=\pm 3KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 2H\Phi$
15	I	$R_{OC}=25KOM;$ $C_{OC}=25H\Phi$	$\Delta R_{OC}=\pm 2KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 3H\Phi$
16	II	$R_{OC1}=120KOM;$ $R_{OC2}=80KOM;$ $C_{OC}=25H\Phi$	$\Delta R_{OC1}=\pm 30KOM;$ $\Delta R_{OC2}=\pm 10KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 5H\Phi$
17	I	$R_{OC}=120KOM;$ $C_{OC}=5H\Phi$	$\Delta R_{OC}=\pm 50KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 0.5H\Phi$
18	II	$R_{OC1}=80KOM;$ $R_{OC2}=30KOM;$ $C_{OC}=5H\Phi$	$\Delta R_{OC1}=\pm 5KOM;$ $\Delta R_{OC2}=\pm 3KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 0.5H\Phi$
19	I	$R_{OC}=80KOM;$ $C_{OC}=60H\Phi$	$\Delta R_{OC}=\pm 25KOM;$ $\Delta C_{OC}=\pm 6H\Phi$

№ ВАР И- АНТ А	ТИПО ВАЯ СХЕМ А	НУЛЕВОЙ УРОВЕНЬ ВАРЬИРОВАНИЯ	ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ
20	II	$R_{OC1}=70\text{КОМ};$ $R_{OC2}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=60\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 10\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 2\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 10\text{НФ}$
21	I	$R_{OC}=30\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 7\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 3\text{НФ}$
22	II	$R_{OC1}=100\text{КОМ};$ $R_{OC2}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=15\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 25\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 3\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 2\text{НФ}$
23	I	$R_{OC}=70\text{КОМ};$ $C_{OC}=40\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 10\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 5\text{НФ}$
24	II	$R_{OC1}=100\text{КОМ};$ $R_{OC2}=80\text{КОМ};$ $C_{OC}=20\text{НФ}$	$\Delta R_{OC1}=\pm 30\text{КОМ};$ $\Delta R_{OC2}=\pm 20\text{КОМ};$ $\Delta C_{OC}=\pm 10\text{НФ}$
25	I	$R_{OC}=15\text{КОМ};$ $C_{OC}=20\text{НФ}$	$\Delta R_{OC}=\pm 2\text{КОМ}; \Delta C_{OC}=\pm 5\text{НФ}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В. MathCAD 2001: Учебный курс. СПб: Питер, 2001. – 621 с.
2. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.
3. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.
4. Серафинович Л.П. Статистическая обработка опытных данных. – Томск, изд-во Томского ун-та, 1980. – 76 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для втузов. – 2-е изд. – М.: Высш. школа, 2000. – 480 с.
6. Бусленко И.П. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Под ред. Шнейдера Ю.А. М.: Физматгиз, 1962.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.
8. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
9. Анисимов Б.В. и др. Машинный расчет элементов ЭВМ. Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.
10. Фомин А.В. и др. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок: Учеб. пособие для ВУЗов/ А.В.Фомин, Ю.И.Боченков, В.А.Сорокопуд; Под ред. А.В.Фомина. – М.: Радио и связь, 1981. – 352 с.
11. Гусев В.П. и др. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В.П.Гусева и А.В.Фомина. – М.: Советское радио, 1963. – 368 с.
12. Барабашук В.И. и др. Планирование эксперимента в технике/ В.И.Барабашук, Б.П.Креденцер, В.И.Мирошниченко; Под ред. Б.П.Креденцера. – К.: Техника, 1984. – 200 с.
13. Сыпчук П.П., Талалай А.М. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. – М.: Сов. Радио, 1979. – 168 с.
14. Алексеев В.П., Озёркин Д.В. Основы научных исследований и патентоведения: Уч. пособие. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2003. – 180 с.
15. Micro-CAP 7.0. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual - Sunnyvale: Spectrum Software, 2001.
16. Micro-CAP 7.0. Electronic Circuit Analysis Program. User's Guide – Sunnyvale: Spectrum Software, 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – НЕКОТОРЫЕ ВСТРОЕННЫЕ ФУНКЦИИ MATHCAD

Таблица

Функция	Аргументы	Описание
$a... (z)$ (вместо многоточия \sin , \cos и т.д.)	z - аргумент	Обратная тригонометрическая или гиперболическая функция
$\arg(z)$	z - аргумент функции	Аргумент комплексного числа
$\operatorname{atan2}(x,y)$	x, y - координаты точки	Угол, отсчитываемый от оси ox до точки (x,y)
$\operatorname{ceil}(x)$	x - аргумент	Наименьшее целое, не меньшее x
$\cos(z)$	z - аргумент	Косинус
$\cosh(z)$	z - аргумент	Гиперболический косинус
$\cot(z)$	z - аргумент	Котангенс
$\operatorname{coth}(z)$	z - аргумент	Гиперболический котангенс
$\operatorname{csc}(z)$	z - аргумент	Косеканс
$\operatorname{csch}(z)$	z - аргумент	Гиперболический косеканс
$\operatorname{csgn}(z)$	z - аргумент	Комплексный знак числа
$\exp(z)$	z - аргумент	Экспонента в степени z
$\operatorname{expfit}(x,y,g)$	x, y - векторы данных; g - вектор начальных значений a, b, c	Регрессия экспонентой $ae^{bx} + c$
$\operatorname{find}(x1,x2,...)$	$x1,x2,...$ - переменные	Возвращает корень алгебраического уравнения (скаляр) или системы (вектор), определенных в блоке с given
$\operatorname{floor}(x)$	x - аргумент	Наибольшее целое число, меньшее или равное x

Продолжение таблицы

Функция	Аргументы	Описание
Given		Ключевое слово для ввода систем уравнений, неравенств и т.п.
$\text{if}(\text{cond},x,y)$	cond - логическое условие; x, y - значения, возвращаемые, если условие верно (ложно)	Функция условия
$\text{Im}(z)$	z – аргумент	Мнимая часть комплексного числа
$\text{intercept}(\mathbf{x},\mathbf{y})$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных	Коэффициент b линейной регрессии $b + ax$
$\text{line}(\mathbf{x},\mathbf{y})$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных	Вектор из коэффициентов линейной регрессии $b + ax$
$\text{linterp}(\mathbf{x},\mathbf{y},t)$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных; t – аргумент	Кусочно-линейная интерполяция
$\text{ln}(z)$	z – аргумент	Натуральный логарифм
$\text{lnfit}(\mathbf{x},\mathbf{y})$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных	Регрессия логарифмической функцией $a \cdot \ln(x) + b$
$\text{log}(z)$	z – аргумент	Десятичный логарифм
$\text{log}(z,b)$	z – аргумент	Логарифм z по основанию b
$\text{logfit}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{g})$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных; \mathbf{g} - вектор начальных значений a,b,c	Регрессия логарифмической функцией $a \cdot \ln(x + b) + c$
$\text{lsolve}(\mathbf{A},\mathbf{b})$	\mathbf{A} - матрица СЛАУ; \mathbf{b} - вектор правых частей	Решение системы линейных уравнений (СЛАУ)

Продолжение таблицы

Функция	Аргументы	Описание
$\text{maximize}(f,x1,\dots)$	$f(x1, \dots)$ – функция; $x1, \dots$ - аргументы, по которым производится максимизация	Вектор значений аргументов, при которых функция f достигает максимума (возможно задание дополнительных условий в блоке с given)
$\text{minimize}(f,x1,\dots)$	$f(x1, \dots)$ – функция; $x1, \dots$ - аргументы, по которым производится минимизация	Вектор значений аргументов, при которых функция f достигает минимума (возможно задание дополнительных условий в блоке с given)
$\text{polyroots}(v)$	v - вектор, составленный из коэффициентов полинома	Возвращает вектор всех корней полинома
$\text{pwfit}(x,y,g)$	x, y - векторы данных; g - вектор начальных значений a, b, c	Регрессия степенной функцией $a \cdot x^b + c$
$\text{Re}(z)$	z - аргумент	Действительная часть комплексного числа
$\text{root}(f(x,\dots),x[a,b])$	$f(x, \dots)$ – функция; x – переменная; (a, b) – интервал поиска корня	Возвращает корень функции
$\text{round}(x,n)$	x – аргумент; n - число знаков округления после десятичной точки	Округление
$\text{sec}(z)$	z - аргумент	Секанс
$\text{sech}(z)$	z - аргумент	Гиперболический секанс
$\text{sign}(x)$	x - аргумент	Знак числа
$\text{signum}(z)$	z - аргумент	Комплексный знак числа $ z $

Окончание таблицы

Функция	Аргументы	Описание
$\sin(z)$	z - аргумент	Синус
$\sinh(z)$	z - аргумент	Гиперболический синус
$\text{slope}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	\mathbf{x}, \mathbf{y} - векторы данных	Коэффициент a линейной регрессии $b + ax$
$\tan(z)$	z - аргумент	Тангенс
$\tanh(z)$	z - аргумент	Гиперболический тангенс
$\text{trunc}(x)$	x - аргумент	Целая часть числа

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – НЕКОТОРЫЕ СООБЩЕНИЯ ОБ ОШИБКАХ, ВЫДАВАЕМЫЕ ПРОГРАММОЙ MATHCAD

Таблица

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
A "Find" or "Minerr" must be preceded by a matching "Given"	Find или Minerr должны предваряться ключевым словом Given	Эта ошибка выделяет функцию Find или Minerr при их несогласованности с Given	Каждый вычислительный блок, который заканчивается функцией Find или Minerr, должен начинаться с ключевого слова Given
All evaluations resulted in either an error or a complex result	Вычисления приводят к ошибке или комплексному результату	MathCAD не может начертить некоторые точки, потому что не существует действительных значений для их нанесения на график	Это сообщение может появиться, если имеется ошибка или все значения комплексные
Arguments in function definitions must be names	Аргументы в определениях функции должны быть именами	Выделенное определение функции содержит неправильный перечень аргументов	В списке аргументов должны быть правильно поименованы переменные, или список имен необходимо отделить запятыми

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
Can't converge to a solution	Не сходится к решению	Численный метод расходится (не может найти решения)	Убедитесь, что операция не применяется к функции в области непосредственной близости точки ее сингулярности (деления на ноль). Попробуйте поменять параметры численного метода (например, начальное приближение). Попробуйте увеличить константу TOL, т.е. осуществить поиск решения с худшей погрешностью. Попробуйте поменять численный алгоритм, если это возможно (вызвав контекстное меню нажатием на месте ошибки правой кнопки мыши)
Can't divide by zero	Деление на ноль невозможно	Где-то в программе или внутри численного метода возникло деление на ноль	Найдите место деления на ноль и устраните его. Попробуйте поменять параметры численного метода, константы точности или сам численный алгоритм
Could not find a solution	Невозможно найти решение	Численный метод расходится (не может найти решения)	См. "Can't converge to a solution"
Can't plot this many points	Невозможно начертить график с таким большим количеством точек	Попытка построения графика с числом точек, превосходящим возможное	Попробуйте сделать число точек меньше, чем 150000

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
Can't put a " := " inside a solve block.	Нельзя помещать " := " внутрь вычислительного блока	Внутри вычислительного блока не должно быть формулировки присваивания. Он должен содержать только булевы выражения	Используйте панель с булевыми операторами
Can't solve a system having this many equations	Невозможно решить систему, имеющую так много уравнений	MathCAD не способен решить систему	
Can't understand the name of this function	Невозможно понять имя этой функции	Такое сообщение может появиться, если в качестве имени функции используется, например, число $b(x)$	Выражение должно соответствовать требованиям, предъявляемым в MathCAD к написанию имен функций
Can't understand this number	Невозможно понять это число	Это выражение содержит символ или десятичную точку там, где это непозволительно	Вы увидите эту ошибку, например, если случайно запишете число так: .452.
Cannot evaluate this accurately at one or more of the values you specified	Невозможно точно вычислить одно или более значений	Эта ошибка появляется, если попытаться вычислить функцию для аргумента, находящегося за пределами точной области определения функции	Проверьте область определения функции
Equation too large	Уравнение слишком большое	Это выражение слишком сложное для вычисления	Разбейте выражение на два или более простых

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
Floating point error	Ошибка вычислений с плавающей точкой	Функция вычисляется в точке, в которой это не разрешено	
Found a singularity while evaluating this expression. You may be dividing by zero	Найдена сингулярность при вычислении этого выражения. Возможно, вы делите на ноль	Вычисляется функция или выполняется операция с недопустимым значением	Например, это сообщение возникнет при попытке деления на ноль или обращения к сингулярной матрице; разберитесь, где это происходит
Found a number with a magnitude greater than 10^{307}	Найдено число, превышающее значение 10^{307}		Попробуйте поменять параметры численного алгоритма или сам алгоритм
Illegal context. Press <F1> for help	Недопустимый контекст. Нажмите <F1>, чтобы получить помощь	Часто встречается при синтаксических ошибках	Проверьте синтаксис и порядок расположения формул в документе
Integer too large/ Integer too small	Целое число слишком большое/ слишком маленькое	Это число слишком велико/ мало для работы с ним	Если вы работаете со встроенными функциями, то щелкните на имени функции и вызовите подсказку с помощью <F1>
Invalid format	Недопустимый формат	Аргументы этой функции могут быть некорректны	Если вы работаете со встроенными функциями, то щелкните на имени функции и вызовите подсказку с помощью <F1>

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
Must be function	Этот аргумент должен быть функцией		
Must be positive	Должен быть положительным	Невозможно вычислить эту функцию, когда ее значения меньше или равны нулю	Это сообщение может касаться построения XY- или полярных графиков с логарифмическими осями. Отрицательные числа или ноль не могут располагаться на логарифмических осях
Must be real	Должно быть действительным	Это значение должно быть действительным. Его мнимая часть должна быть нулем	Примером таких выражений могут служить нижний и верхний индексы, решения дифференциальных уравнений, углы
Must be real scalar	Должно быть действительным скаляром	Это значение не должно быть комплексным или мнимым	
No solution found	Не найдено решение		Если вы используете встроенные функции, то щелкните мышью на имени функции и нажмите клавишу <F1> для того, чтобы быть уверенным в корректности использования функции. Однако решение может просто не существовать. <i>См. также "Can't converge to a solution"</i>

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
Not enough memory for this operation	Для этой операции недостаточно памяти	Не хватает памяти, чтобы завершить это вычисление	Попытайтесь освободить немного памяти путем уменьшения массива или матрицы (MathCAD тратит около 8 байт памяти на каждый элемент матрицы), или удаления каких-либо больших побитовых отображений, массивов, матриц
The expression to the left of the equal sign cannot be defined	Выражение слева от знака равенства не может быть определено	В левой части находится что-то, что не является допустимым определяемым выражением	В левой части можно разместить одно из следующих определений: <ul style="list-style-type: none"> - имя переменной; - имя переменной с верхним или нижним индексом; - явный вектор или матрицу; - имя функции с аргументами $f(x,y)$. Любые другие выражение не допустимы
This expression is incomplete. You must fill in the placeholders	Это выражение неполное. Необходимо добавить содержимое в местозаполнители	Не заполнены указанные местозаполнители	Необходимо дописать числа или выражения в указанные местозаполнители
This expression is incomplete. You must provide an operator	Это выражение неполное. Необходимо вставить оператор	Не заполнены местозаполнители оператора или пустое пространство между двумя операндами	Это могло произойти при удалении оператора, проверьте правильность ввода выражения

Продолжение таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
This function has too many arguments	Эта функция имеет слишком много аргументов	Выделенное выражение содержит функцию с числом аргументов большим, нежели требуется	Проверьте правильность применения функции
This function is undefined at one or more of the points you specified	Эта функция не определена для одной или более точек	Попытка вычисления оператора или функции с неподходящими значениями	Например, выражения $-3!$ и $\ln(0)$ выдадут ошибку, т.к. факториал не определен для отрицательного числа, а логарифм для нуля
This function needs more arguments	Этой функции не хватает аргументов	Выделенное выражение содержит функцию с меньшим, нежели требуется, числом аргументов	Для встроенных функций, щелкните мышью на имени функции и воспользуйтесь подсказкой <F1>, чтобы проверить правильность числа и типа аргументов; для функции пользователя проверьте ее определение
This operation can only be performed on a function	Эта операция может быть произведена только над функцией	Этот аргумент должен быть функцией	Для встроенных функций, щелкните мышью на имени функции и воспользуйтесь подсказкой <F1>
This subscript is too large	Этот нижний индекс слишком велик	Попытка использовать верхний или нижний индекс, который превышает ограничения	
This value must be an integer greater than 1	Это значение должно быть целым числом, превосходящим 1	Это значение должно быть >1	При использовании встроенных функций щелкните мышью на имени функции и нажмите клавишу <F1>

Окончание таблицы

Ошибка	Перевод	Вероятная причина	Возможные пути устранения
This variable or function is not defined above	Эта переменная или функция не определена выше	Имя неопределенной функции будет помечено красным цветом	Удостоверьтесь, что эта функция или переменная определена выше. Это сообщение появится, если переменная некорректно используется в глобальном определении. Эта ошибка часто свидетельствует о том, что другое уравнение выше в документе является ошибкой. В этом случае, все выражения, использующие выражение с ошибкой, будут помечены красным цветом
Value of subscript or superscript is too big (or too small) for this array	Значение нижнего или верхнего индекса слишком велико (или слишком мало) для этого массива	Это выражение использует нижний или верхний индекс, который относится к несуществующему элементу массива	
This is not a scalar. Press <F1> for help	Это не скаляр. Нажмите клавишу <F1>, чтобы получить помощь	Использован вектор или выражение с интервалами, или какой-то другой тип выражения, где требуется применение скаляра	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICROCAP

При создании принципиальных схем используются числа, переменные и математические выражения. Числовые значения параметров компонентов представляются в виде:

- действительных чисел с фиксированным десятичным знаком (**обратим внимание, что в качестве десятичного знака в программе MicroCAP используется точка**). Например, сопротивление 2,5 кОм, записывается как 2500, а емкость 1 мкФ как 0.000001;

- действительных чисел с плавающим десятичным знаком - научная нотация. Например, емкость 1 мкФ может быть записана как 1E-6;

- действительных чисел с плавающим десятичным знаком - инженерная нотация, согласно которой различные степени числа 10 обозначаются следующими суффиксами:

F ФЕМТО 10^{-15}

P ПИКО 10^{-12}

N НАНО 10^{-9}

U МИКРО 10^{-6}

M МИЛЛИ 10^{-3}

K КИЛО 10^3

MEG МЕГА 10^6

G ГИГА 10^9

T ТЕРА 10^{12}

Для экономии места на осях X, Y графиков результатов моделирования малая буква "m" обозначает 10^{-3} , большая буква "M" – 10^6 (вместо MEG). Во всех остальных случаях большие и малые буквы не различаются.

Например, сопротивление 1,5 МОм может быть записано как 1.5MEG, 1.5meg или 1500K, емкость 1 мкФ как 1U или 1uF. В последнем примере показано, что для большей наглядности после стандартных суффиксов допускается помещать любые символы, которые при интерпретации чисел не будут приниматься во внимание. **Пробелы между числом и буквенным суффиксом не допускаются.**

В программе Micro-CAP ряд констант и переменных имеют стандартные значения:

T – время в секундах;

F – частота в герцах;

DCINPUT1 – первая варьируемая переменная в DC-анализе;

E – $\text{EXP}(1) = 2,718281828$;

S – комплексная частота, равная $2 \cdot \text{PI} \cdot \text{J}$;

GMIN – минимальная проводимость ветви, задаваемая в диалоговом окне Options/Global settings;

PI – число $\pi = 3.14159265389795$;

TEMP – температура компонентов в градусах Цельсия;

V_T – температурный потенциал p - n -перехода, при $TEMP = 27 \text{ }^\circ\text{C}$
 $V_T = 25,86419 \text{ мВ}$;

J – корень квадратный из -1 ;

T_{min} – начальный момент времени расчета переходных процессов;

T_{max} – конечный момент времени расчета переходных процессов;

F_{min} – начальная частота расчета частотных характеристик;

F_{max} – конечная частота расчета частотных характеристик;

P_{GT} – общая мощность, генерируемая в схеме;

P_{ST} – общая мощность, запасаемая в схеме;

P_{DT} – общая рассеиваемая в схеме мощность.

Номера точек, присваиваемые программой MicroCAP автоматически, представляют собой целые числа, например 0, 2, 25. Кроме того, пользователь может присвоить любой точке имя в виде текстовой алфавитно-цифровой переменной, начинающейся с буквы или символа "_" и содержащей не более 50 символов, например A1, Out, Reset. В математических выражениях могут использоваться следующие переменные:

D(A)	Логическое состояние на проводнике A
V(A)	Напряжения в точке A (напряжения измеряются относительно узла "земли", которой программа присваивает номер 0)
V(A,B)	Разность потенциалов между точками A и B
V(D1)	Напряжение между выводами устройства D1
I(D1)	Ток через устройство D1
I(A,B)	Ток через ветвь между точками A и B
IR(Q1)	Ток, втекающий в вывод R устройства Q1
VRS(Q1)	Напряжение между выводами R и S устройства Q1
CRS(Q1)	Емкость между выводами R и S устройства Q1
QRS(Q1)	Заряд емкости между выводами R и S устройства Q1
R(R1)	Сопrotивление резистора R1
C(X1)	Емкость конденсатора или диода X1
Q(X1)	Заряд конденсатора или диода X1
L(X1)	Индуктивность катушки индуктивности или сердечника X1
X(L1)	Магнитный поток в катушке индуктивности или сердечнике L1
B(L1)	Магнитная индукция сердечника L1
H(L1)	Напряженность магнитного поля в сердечнике L1
RND	Случайное число с равномерным законом распределения на отрезке [0, 1]
ONoise	Корень квадратный из спектральной плотности выходного напряжения
INoise	Корень квадратный из спектральной плотности входного напряжения, равной $ONoise / \text{коэффициент передачи по мощности}$

PG(V1)	Мощность, генерируемая источником V1
PS(X1)	Реактивная мощность, накапливаемая в устройстве X1
PD(D1)	Мощность, рассеиваемая в устройстве D1

В этом перечне символы А и В обозначают номера точек схемы, D1 - имя компонента с двумя выводами или управляемого источника, Q1 - имя любого активного устройства или линии передачи. Символы R и S заменяются аббревиатурами выводов устройств согласно следующей таблице:

Устройство	Аббревиатуры выводов	Названия выводов
МОП-транзистор (MOSfets)	D,G,S,B	Сток, затвор, исток, подложка
Полевой транзистор (Jfets)	D,G,S	Сток, затвор, исток
Арсенид-галлиевый транзистор (GaAsfets)	D,G,S	Сток, затвор, исток
Биполярный транзистор (BJT)	B,E,C,S	База, эмиттер, коллектор, подложка
Статически индуцированный биполярный транзистор (IGBT)	C,G,E	Коллектор, затвор, эмиттер
Линия передачи (Tran. Line)	AP, AM, BP, BM	Вход+, вход-, выход+, выход-

Например, следующие выражения означают: $I(R1)$ – ток через резистор R1; $R(Rload)$ – сопротивление резистора Rload; $IC(VT1)$ – ток коллектора биполярного транзистора VT1; $VBE(Q1)$ – напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора Q1.

Приведем список обозначений переменных типа напряжение, ток, емкость и заряд для всех компонентов:

Компонент	Напряжение	Ток	Емкость	Заряд
Резистор	V	I	Нет	Нет
Конденсатор	V	I	C	Q
Индуктивность	V	I	Нет	Нет
Диод	V	I	C	Q
Линия передачи	VAP, VAM, VBP, VBM	IA, IB	Нет	Нет
Биполярный транзистор	VBE, VBC, VEB, VEC, VCB, VCE	IB, IE, IC	CBE, CBC	QBE, QBC

Компонент	Напряжение	Ток	Емкость	Заряд
Биполярный транзистор с выводом подложки	VBE, VBC, VBS, VEB, VEC, VES, VCB, VCE, VBS	IB, IE, IC, IS	CBE, CBC, CCS	QBE, QBC, QCS
МОП-транзистор	VGS, VGD, VGB, VDS, VDG, VDS, VSG, VSD, VSB, VBG, VBD, VBS	IG, IS, ID, IB	CGS, CGD, CGB, CBD, CBS	QGS, QGD, QGB, QBD, QBS
Полевой транзистор	VGS, VGD, VSG, VSD, VDG, VDS	IG, IS, ID	CGS, CGD	QGS, QGD
Арсенид-галлиевый транзистор	VGS, VGD, VSG, VSD, VDG, VDS	IG, IS, ID	CGS, CGD	QGS, QGD
Источники тока или напряжения	V	I	Нет	Нет

После имени переменной в скобках указывается позиционное обозначение компонента. Например, напряжение затвор-исток МОП-транзистора M1 обозначается как VGS(M1).

При указании переменных, выводимых на графиках при проведении моделирования, возможно использовать следующие математические операции.

Арифметические операции

+ сложение;

– вычитание;

* умножение;

/ деление;

DIV целочисленное деление;

MOD остаток целочисленного деления.

Тригонометрические функции от действительных и комплексных величин (x – действительная, z – комплексная величина)

Exp(x) – экспонента;

Ln(x) – натуральный логарифм |x|;

Log(x) или Log10(x) – десятичный логарифм |x|;

Sin(x) – синус, x в радианах;

Cos(x) – косинус, x в радианах;

$\text{Tan}(x)$ – тангенс, x в радианах;

$\text{Asin}(x)$ – арксинус;

$\text{Acos}(x)$ – арккосинус;

$\text{Atn}(x)$ или $\text{Arctan}(x)$ – арктангенс;

$\text{Atan2}(y, x) = \text{Atn}(y/x)$;

$\text{Sinh}(z)$ – гиперболический синус;

$\text{Cosh}(z)$ – гиперболический косинус;

$\text{Tanh}(z)$ – гиперболический тангенс;

$\text{Coth}(z)$ – гиперболический котангенс.

Прочие функции от действительных и комплексных величин

$\text{ABS}(y)$ – абсолютное значение y ;

$\text{SQRT}(y)$ – корень квадратный из модуля y ;

$\text{SGN}(y)$ – знак числа y ;

$\text{POW}(y, x)$ – степенная функция комплексных величин обозначаемая как y^x ;

$\text{PWR}(y, x)$ – действительная часть степенной функции y^x ;

$**$ – степенная функция, например $5**2=25$;

$\text{PWRs}(y, x)$ – действительная часть степенной функции y^x ;

$\text{FACT}(n)$ – факториал целого числа n ;

$\text{JN}(n, z, [m])$ – функция Бесселя n -го порядка первого рода комплексного аргумента z , полученная суммированием первых m членов ряда; по умолчанию $m = 10$;

$\text{J0}(z)$ – функция Бесселя нулевого порядка первого рода комплексного аргумента z , аналогичная $\text{JN}(0, z, 10)$;

$\text{J1}(z)$ – функция Бесселя первого порядка первого рода комплексного аргумента z , аналогичная $\text{JN}(1, z, 10)$;

$\text{YN}(n, z, [m])$ – функция Бесселя n -го порядка второго рода комплексного аргумента z , полученная суммированием первых m членов ряда; по умолчанию $m = 10$;

$\text{Y0}(z)$ – функция Бесселя нулевого порядка второго рода комплексного аргумента z , аналогичная $\text{YN}(0, z, 10)$;

$\text{Y1}(z)$ – функция Бесселя нулевого порядка второго рода комплексного аргумента z , аналогичная $\text{YN}(1, z, 10)$;

$\text{Series}(n, n1, n2, z)$ – текущая сумма ряда комплексной функции $z = z(n)$ при изменении n от $n1$ до $n2$;

RND – случайные числа на отрезке $[0, 1]$ с равномерным законом распределения;

$\text{STP}(x)$ – функция единичного скачка, равная 1 при $x > 0$ и равная 0 при $x < 0$;

$\text{IMPULSE}(y)$ — Импульсная функция, равная y и площадь которой равна 1;

$\text{TABLE}(x, x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)$ – табличная зависимость функции y от x . Переменная x должна быть определена как параметр с помощью директивы

.define. Задаются координаты точек (x_i, y_i) , в промежуточных точках используется линейная интерполяция. Если $x < x_i$, то $y = y_1$, если $x > x_n$, то $y = y_n$;

Waveform(имя файла,y) – импорт функции y из файла *имя файла*, имеющего стандартный формат Micro-CAP; в этот файл пользователя (User source) могут быть записаны дискретизированные результаты моделирования, если на закладке Save Waveforms команды **Properties (F10)** выбрать из списка имя переменной и ввести имя файла *.USR;

IMPORT(имя_файла,y) – импорт функции y из файла. Текстовый файл должен иметь формат SPICE или Micro-CAP; в него помещается таблица значений переменных, в качестве которых может быть время (T), частота (F), напряжение источника напряжений ($V(\text{имя источника})$), ток источника тока ($I(\text{имя источника})$), и выражение для y ;

SUM(y,x[,start]) – текущий интеграл от переменной y по переменной x ; начальное значение x равно *start*;

SD(y,[start]) – текущий интеграл от переменной y по времени T при анализе переходных процессов, по частоте F при АС-анализе или по переменной DCINPUT1 при DC-анализе; начальное значение независимой переменной равно *start*;

DD(y) – производная y по времени T при анализе переходных процессов, по частоте F при АС-анализе частотных характеристик и по переменной DCINPUT1 при DC-анализе по постоянному току;

RMS(y[,start]) – текущее среднеквадратичное отклонение переменной y при интегрировании по времени T при анализе переходных процессов, по частоте F при АС-анализе частотных характеристик и по переменной DCINPUT1 при DC-анализе по постоянному току; начальное значение независимой переменной равно значению *start*;

AVG(y[,start]) – текущее среднее значение переменной y при интегрировании по времени T при анализе переходных процессов, по частоте F при АС-анализе частотных характеристик и по переменной DCINPUT1 при DC-анализе по постоянному току; начальное значение независимой переменной равно значению *start*;

DEL(y) – приращение процесса $y(t)$ относительно предыдущей точки при расчете переходных процессов. Производная рассчитывается как отношение двух таких операторов, например производная dy/dt равна DEL(y)/DEL(t);

SDT(y) – текущий интеграл процесса $y(t)$ относительно времени T, начиная от $T = T_{\min}$;

DDT(y) – производная процесса $y(t)$ относительно времени T;

DIFA(u,v[,d]) – сравнение значений двух функций u и v во всех дискретных точках при расчете переходных процессов. DIFA присваивается значение 1, если во всех точках абсолютное значение разности функций меньше величины d , в противном случае присваивается 0. Параметр d необязательный, по умолчанию полагается $d = 0$;

$DIFD(u, v, [d])$ – сравнение значений двух логических u и v во всех дискретных точках при расчете переходных процессов. DIFA присваивается значение 1, если во всех точках значения функций отличаются друг от друга, в противном случае присваивается 0. В течение первых d секунд после начала расчета переходных процессов сравнение не проводится. Параметр d необязательный, по умолчанию полагается $d = 0$;

$DB(z)$ – величина в децибелах, равная $20 \cdot \log(|z|)$;

$RE(z)$ – действительная часть z ;

$IM(z)$ – мнимая часть z ;

$MAG(z)$ – модуль z . При построении графиков допустимо просто указать z ;

$PH(z)$ – фаза z в градусах;

$GD(z)$ – групповое время запаздывания.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – ШАБЛОНЫ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ, ВСТРОЕННЫЕ В MICROCAP

Fall_Time – нахождение разности значений аргумента на участке убывания функции от значения *High* до значения *Low*;

Frequency – нахождение частоты периодической функции на *N*-ом участке графика. Частота – это обратная величина периоду. Период определяется как разность значений аргумента, за которое совершается одно полное колебание, и измеряется для среднего уровня функции;

High_X – нахождение абсциссы точки глобального максимума на графике функции;

High_Y – нахождение ординаты точки глобального максимума на графике функции;

Low_X – нахождение абсциссы точки глобального минимума на графике функции;

Low_Y – нахождение ординаты точки глобального минимума на графике функции;

Peak_Valley – нахождение разности значений функции на интервале от *N*-ого локального максимума до следующего за ним локального минимума;

Peak_X – нахождение абсциссы точки, соответствующей *N*-ому локальному максимуму на графике функции;

Peak_Y – нахождение ординаты точки, соответствующей *N*-ому локальному максимуму на графике функции;

Period – нахождение периода функции на *N*-ом участке графика. Период определяется как разность значений аргумента, за которое совершается одно полное колебание, и измеряется для среднего уровня функции;

Rise_Time – нахождение разности значений аргумента на участке возрастания функции от значения *Low* до значения *High*;

Phase_Margin – нахождение запаса устойчивости по фазе для комплексной функции. Шаблон *Phase_Margin* может применяться только совместно со встроенными функциями *DB* и *PH* (см. Приложение 3);

Slope – нахождение отношения приращения функции к приращению аргумента $\Delta y/\Delta x$ в окрестности точки с заранее заданным аргументом *X*;

Valley_X – нахождение абсциссы точки, соответствующей *N*-ому локальному минимуму на графике функции;

Valley_Y – нахождение ординаты точки, соответствующей *N*-ому локальному минимуму на графике функции;

Width – нахождение ширины импульса на *N*-ом участке графика периодической функции для заранее определенного уровня *Y*;

X_Delta – нахождение на *N*-ом участке графика приращения аргумента, соответствующее заранее определенному приращению функции от *Y Low* до *Y High*;

X_Level – нахождение на N -ом участке графика значения аргумента X , при котором функция принимает заранее определенное значение Y ;

X_Range – нахождение на N -ом участке графика диапазона (размаха) значений аргумента при заранее заданном диапазоне значений функции от Y_{Low} до Y_{High} ;

Y_Delta – нахождение приращения функции, соответствующее заранее определенному приращению аргумента от X_{Low} до X_{High} ;

Y_Level – нахождение значения функции Y , при котором аргумент принимает заранее определенное значение X ;

Y_Range – нахождение диапазона (размаха) значений функции при заранее заданном диапазоне значений аргумента от X_{Low} до X_{High} .

ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – НЕКОТОРЫЕ СООБЩЕНИЯ ОБ ОШИБКАХ, ВЫДАВАЕМЫЕ ПРОГРАММОЙ MICROCAP

В этом Приложении приведены некоторые сообщения об ошибках, возникающие при моделировании в программе MicroCAP 7, а также их краткое толкование. Список сообщений об ошибках упорядочен по алфавиту.

1. Can't find label in V(...). *Не найдена метка в символическом выражении V(...).*

Ошибка возникает из-за несоответствия позиционного обозначения ЭРЭ на схеме и позиционного обозначения в символическом выражении, когда оно записывается в таблице диалоговых окон DC Analysis Limits, AC Analysis Limits или Transient Analysis Limits.

Ошибка может также возникнуть, если в символическом выражении содержится указание на несуществующую на схеме контрольную точку.

2. Expecting '...' Parameter: ... Text: ... *Ожидается '...' в параметре ... в тексте....*

Сообщение возникает, когда в математической модели ЭРЭ формата SPICE содержится недопустимый символ или синтаксическая ошибка. При этом вместо символов «многоточие» будут присутствовать ожидаемый символ, название параметра и начальный фрагмент описания математической модели. Следует перейти к файлу библиотеки математических моделей и исправить указанную ошибку.

3. Failed to converge in specified number of iterations in time=0. *Прекращение сходимости за указанное число итераций в нулевой момент времени.*

Ошибка, возникающая при работе вычислительных алгоритмов программы MicroCAP. Возможных причин может быть несколько: неправильно изображенная схема, неверно заданные номиналы, неверно заданные параметры моделирования в диалоговых окнах DC Analysis Limits, AC Analysis Limits или Transient Analysis Limits.

4. Floating point 'overflow'. *Переполнение разрядов в ячейках оперативной памяти при работе с числами с плавающей запятой.*

Ошибка возникает в случае, когда в схеме встречаются (намеренно или случайно) бесконечно малые или бесконечно большие числовые значения. Часто причина ошибки заключается в неправильном использовании стандартных суффиксов MicroCAP для обозначения кратных и дольных единиц.

5. Illegal character in label '...'. *Непредусмотренная буква в метке '...'.*
Ошибка возникает, если в позиционных обозначениях ЭРЭ на схеме используются буквы русского алфавита.

6. Illegal temperature. *Непредусмотренная температура.*

Ошибка возникает при указании бесконечно малой (менее -273°C) или бесконечно большой температуры окружающей среды.

7. Illegal time range. *Непредусмотренный временной диапазон.*

Ошибка возникает при неправильном указании временного диапазона в диалоговом окне Transient Analysis Limits.

8. Inductor/voltage source loop found. *Найдено короткое замыкание источника напряжения или катушки индуктивности.*

Ошибка возникает, когда на схеме какой-либо проводник шунтирует источник напряжения или катушку индуктивности.

9. Matrix singular. *Единичная матрица.*

Ошибка возникает, когда при расчете по постоянному току в вычислительном алгоритме Ньютона-Рафсона появляется единичная матрица. Такой результат следствие неправильно заданных номиналов ЭРЭ или неправильно изображенной электрической схемы.

10. Missing model statement ‘...’. *Отсутствующее наименование математической модели.*

Ошибка возникает либо при ошибочном написании имени математической модели, либо при отсутствии таковой в библиотеки математических моделей.

11. Need at least two values for ‘SIN’. *Нужно, по крайней мере, два значения для задания синусоидального сигнала.*

Обычно ошибка возникает при отсутствии параметров синусоидального источника напряжения или тока при попытке провести моделирования во временной области. Подобное сообщение может появляться при отсутствии параметров у других источников сигнала (импульсных, экспоненциальных, кусочно-линейных и т.д.).

12. No Model Name Given. *Математической модели ЭРЭ не дано наименование.*

Ошибка, характерная при размещении на поле чертежа многопараметрических ЭРЭ, описание которых содержится в математических моделях.

13. Node ... has no DC path to ground. *Узел не имеет соединения по постоянному току с общим проводником.*

Ошибка возникает при неправильном соединении проводниками ЭРЭ. Возможны следующие случаи: разрыв проводника в электрической цепи, наличие на схеме несоединенных выводов ЭРЭ, параллельно-последовательное соединение подряд нескольких емкостей (приводит к появлению электрического узла без гальванической связи с остальной схемой).

14. Source not found. *Источник не найден.*

Ошибка возникает при указании в диалоговых окнах DC Analysis Limits, AC Analysis Limits или Transient Analysis Limits на несуществующий источник напряжения или тока.

15. The AC signal magnitudes of all sources in this circuit are zero. *Амплитуды переменного сигнала всех источников в этой схеме равны нулю.*

Обычно ошибка возникает, если не указана амплитуда переменного сигнала в источнике напряжения или тока при попытке провести моделирование в частотной области.

16. The circuit is missing a ground. *В электрической схеме отсутствует общий проводник.*

По правилам программы MicroCAP каждая электрическая схема должна иметь общий проводник с нулевым потенциалом.

17. The high limit and low limit must be non-zero when using log stepping. *Верхний предел и нижний предел должны быть ненулевыми, когда используется логарифмический шаг.*

Ошибка возникает при моделировании по постоянному току или в частотной области и связана с неправильным заданием диапазонов варьирования переменной или неправильным шагом приращения.

18. Unknown identifier ‘...’ in ‘...’. *Неизвестный идентификатор ‘...’ в ‘...’.*

Ошибка возникает, когда в символических выражениях или позиционных обозначениях ЭРЭ встречается неизвестный (нерезервированный) в программе MicroCAP символ.

19. Value must be greater than or equal to zero. *Значение должно быть либо больше нуля, либо равно нулю.*

Ошибка возникает, когда по физическому смыслу переменная должна принимать только неотрицательные значения.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

КАФЕДРА КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАППАРАТУРЫ (КИПР)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

**«СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЭА ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО»**
по дисциплине «Теория надежности»

Выполнил
студент группы 230-1
_____ М.Н.Безупречный
15 декабря 2012 г.

Проверил
доцент каф. КИПР
_____ Д.В.Озёркин
« » _____ 2012 г.

Томск, 2012

Цели работы

1. Изучение статистического метода исследования по Монте-Карло;
2. Знакомство со способами задания случайных величин в программах MathCAD и MicroCAP;
3. Приобретение навыков построения гистограмм распределения случайных величин;
4. Знакомство с некоторыми свойствами нормального закона распределения случайных величин.

Лабораторное задание

Условие. Требуется провести статистический анализ по методу Монте-Карло активного фильтра низких частот (ФНЧ), типовая схема которого представлены на рисунке П.6.1. Предполагается, что партия электрорадиоэлементов $R_{OC} = 100$ кОм и $C_{OC} = 75$ нФ в условиях серийного производства имеет случайный 10% разброс своих значений от номинального. Разброс значений подчинен нормальному (гауссовскому) распределению, что обуславливает случайные значения выходных параметров ФНЧ: верхней частоты полосы пропускания f_B и коэффициента передачи K_U . Сопротивления резисторов $R_{КОР} = R_{ВХ} = 1$ кОм, коэффициент усиления ОУ $K_{U0} = 10^6$. Уровень доверительной вероятности 99.7%.

Необходимо построить гистограмму распределения верхней частоты полосы пропускания ФНЧ по результатам измерений на партии из $N = 100$ штук ЭРЭ R_{OC} и C_{OC} . Требуется также найти основные числовые характеристики полученного распределения.

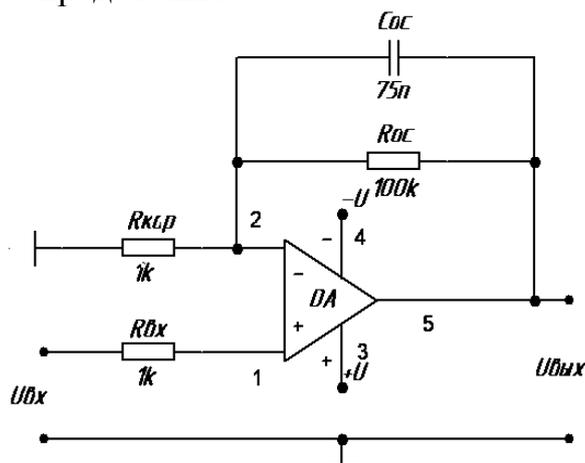


Рисунок П.6.1 – Типовая схема фильтра низких частот

Выполнение.

I этап. Статистическое исследование по методу Монте-Карло в системе MathCAD.

По таблице 1 (стр. 35) лабораторного практикума для заданного уровня доверительной вероятности $P = 99.7\%$ находим стандартную меру отклонения $\sigma_D = 3$.

Листинг первой части исследования и поле рассеяния случайных величин R_{OC} и C_{OC} (рисунок П.6.2).

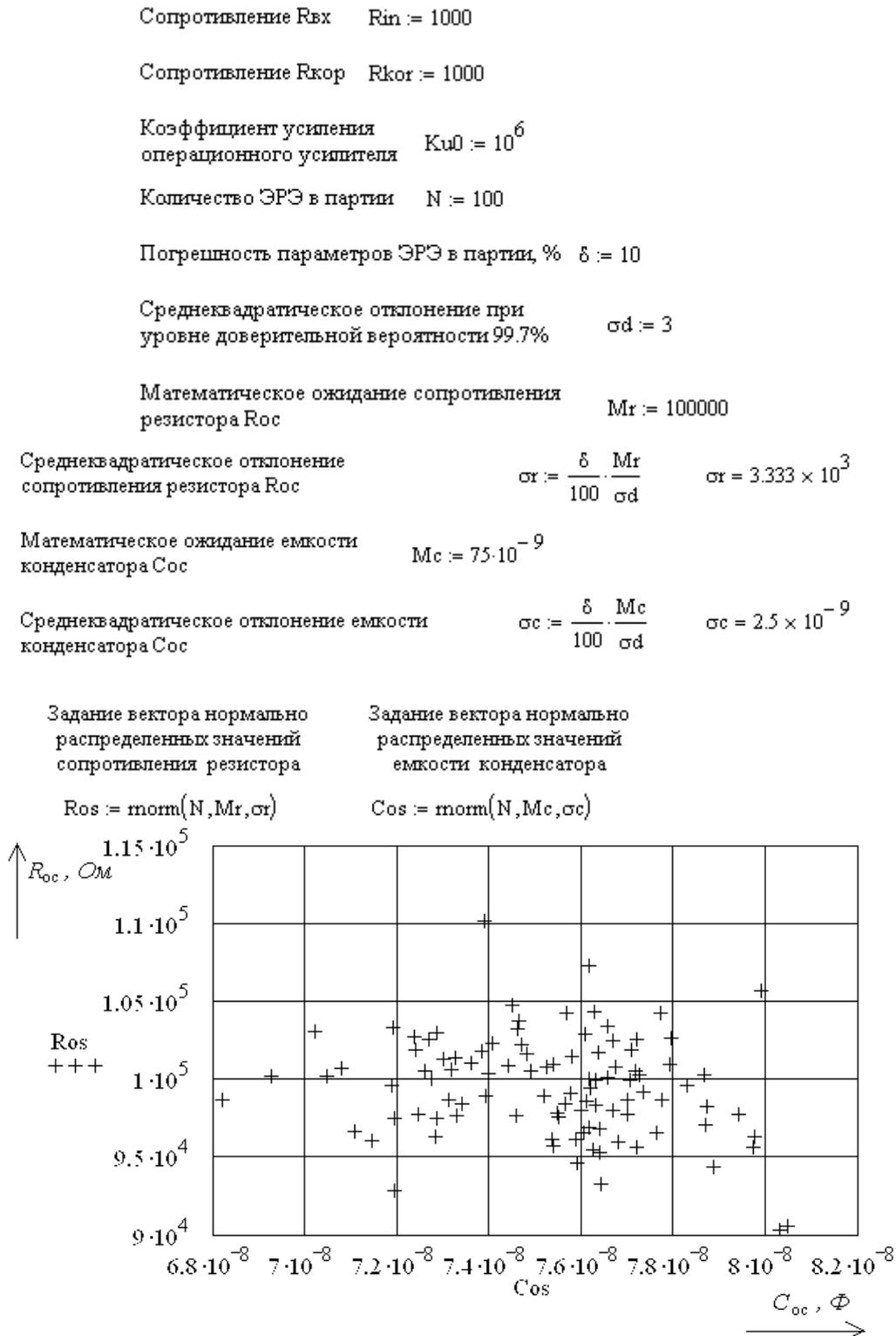


Рисунок П.6.2 – Поле рассеяния случайных величин R_{OC} и C_{OC}

Анализ поля рассеяния позволяет утверждать, что случайные величины R_{OC} и C_{OC} не имеют взаимной корреляционной связи.

Передаточная функция четырехполюсника, включенного в цепь ООС усилителя (рисунок П.6.1), имеет вид:

$$W_q(p) = \frac{K_q (T_{q1}p + 1)}{T_{q2}p + 1},$$

где

$$K_q = \frac{R_{kop}}{R_{kop} + R_{oc}}; T_{q1} = R_{oc}C_{oc}; T_{q2} = \frac{R_{oc}R_{kop}C_{oc}}{R_{kop} + R_{oc}}.$$

Тогда передаточная функция усилителя с $W_q(p)$ в цепи ООС равна:

$$W_{OY_OOC}(p) = \frac{K_{u0}}{1 + K_q K_{u0}} \cdot \frac{T_{q2}p + 1}{\frac{T_{q2} + K_q K_{u0} T_{q1}}{1 + K_q K_{u0}} p + 1},$$

где K_{U0} – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

В нижеприведенном листинге найдена верхняя частота полосы пропускания фильтра $f_B \approx 21$ Гц. Следовательно, при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC} полоса пропускания ФНЧ по уровню -3 дБ составляет 21 Гц (рисунок П.6.3).

```

Шаг геометрической прогрессии для
вычисления очередного значения частоты Step := 1.007

Диапазон расчетных точек j := 0..1400

Табулирование диапазона частот от 1 Гц до 17 кГц f_j := Step^j

Номинальные значения компонентов передаточной функции фильтра
Kchnom := Rkor / (Rkor + Mr) Tch1nom := Mr * Mc Tch2nom := (Mr * Rkor * Mc) / (Rkor + Mr)

Табулированная функция АЧХ фильтра для номинальных значений
Wnom_j := 20 * log [ (Ku0 / (1 + Kchnom * Ku0)) * (Tch2nom * (i * 2 * pi * f_j) + 1) / ((Tch2nom + Kchnom * Ku0 * Tch1nom) * (i * 2 * pi * f_j) + 1) ]

Нахождение номера отсчета, соответствующего уровню в -3дБ
от максимального коэффициента передачи

Number_nom := j ← 0
while Wnom_j > Wnom_0 - 3
j ← j + 1
j

Нахождение пороговой частоты по уровню в -3дБ

Freq_nom := Step^Number_nom Freq_nom = 21.228

```

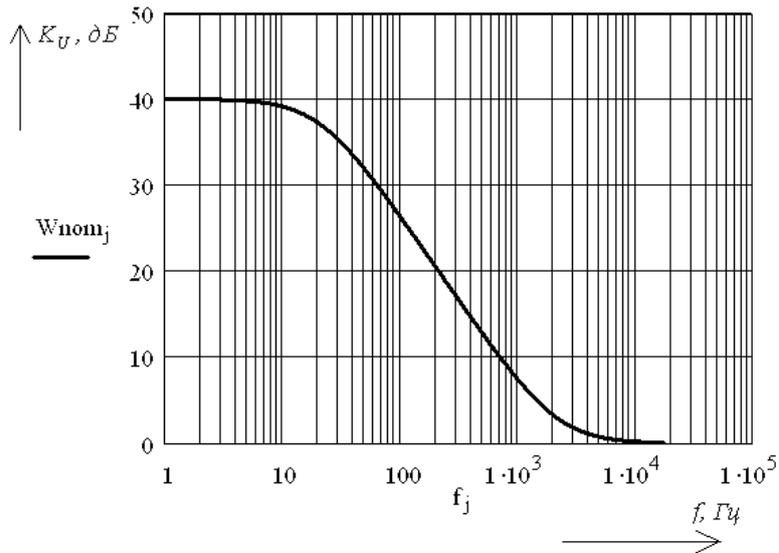


Рисунок П.6.3 – ЛАЧХ при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC}

В нижеприведенном листинге проведено статистическое исследование по методу Монте-Карло, в результате которого найден вектор $Freq$ значений верхней частоты полосы пропускания фильтра для каждой из 100 реализаций. На рисунке П.6.4 представлено семейство ЛАЧХ фильтра для первых десяти реализаций.

Диапазон реализаций $i := 0..(N - 1)$

Векторы значений для компонентов передаточной функции фильтра

$$Kch_1 := \frac{Rkor}{Rkor + Ros_1} \quad Tch1_1 := Ros_1 \cdot Cos_1 \quad Tch2_1 := \frac{Ros_1 \cdot Rkor \cdot Cos_1}{Rkor + Ros_1}$$

Семейство табулированных АЧХ фильтра

$$W_{1,j} := 20 \cdot \log \left[\left| \frac{Ku0 \cdot \frac{Tch2_1 \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j) + 1}{(Tch2_1 + Kch_1 \cdot Ku0 \cdot Tch1_1) \cdot (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_j)}}{1 + Kch_1 \cdot Ku0} + 1 \right| \right]$$

Вектор коэффициентов передачи фильтра на постоянном токе для каждой реализации

$$W_post_1 := W_{1,0}$$

Вектор номеров отсчетов, соответствующих уровню в -3дБ от максимального коэффициента передачи для каждой реализации

$$Number(i) := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ \text{while } W_{1,j} \geq [W_post_1 - 3] \\ \quad j \leftarrow j + 1 \\ j \end{cases}$$

Вектор пороговых частот по уровню в -3дБ для каждой реализации -
суть полоса пропускания фильтра низких частот

$$Freq_1 := Step^{Number(i)}$$

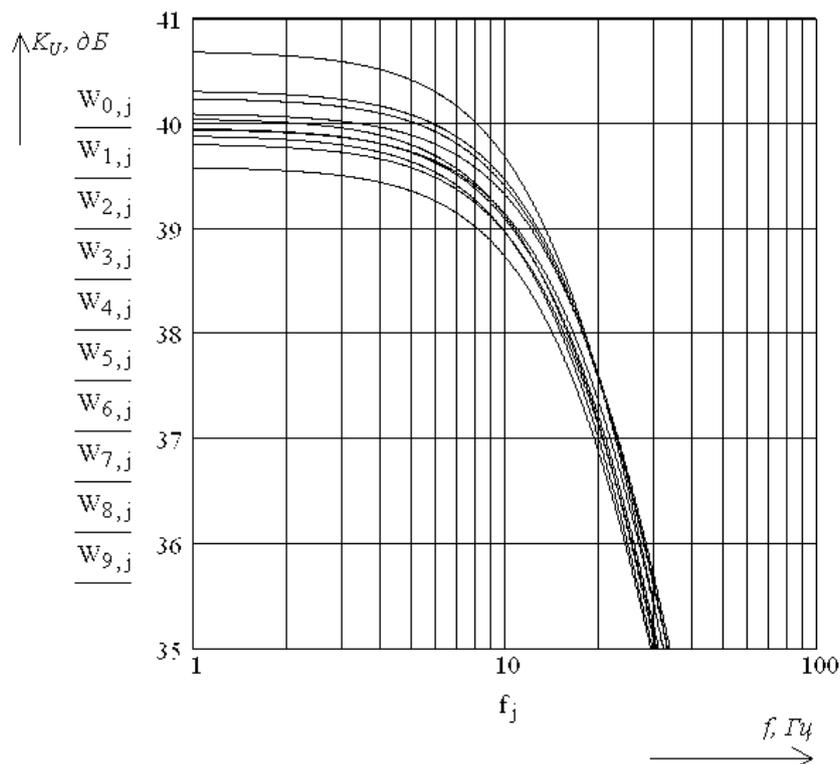


Рисунок П.6.4 – Семейство ЛАЧХ для первых десяти реализаций (увеличенный фрагмент НЧ области)

Заключительная часть этапа исследования связана со статистической обработкой вектора $Freq$ значений верхней частоты.

Минимальное значение полосы пропускания $Min\Delta f := \min(Freq)$ $Min\Delta f = 18.986$

Максимальное значение полосы пропускания $Max\Delta f := \max(Freq)$ $Max\Delta f = 23.901$

Математическое ожидание полосы пропускания $mean(Freq) = 21.364$

Среднеквадратическое отклонение полосы пропускания $stdev(Freq) = 0.891$

Количество интервалов в гистограмме $int := \text{round}(1 + 3.3 \cdot \log(N), 0)$ $int = 8$

Ширина интервала $h := \frac{Max\Delta f - Min\Delta f}{int}$ $h = 0.614$

Построение гистограммы $g := \text{histogram}(int, Freq)$

Помимо гистограммы с вычисленным по правилу Старджесса количеством интервалов $int = 8$, были построены также гистограммы с количеством интервалов 9, 10 и 11. Сравнительный анализ показал, что наибольшее соответствие теоретической кривой плотности нормального распределения имеет гистограмма с количеством интервалов $int = 10$. Этот вариант гистограммы представлен на рисунке П.6.5.

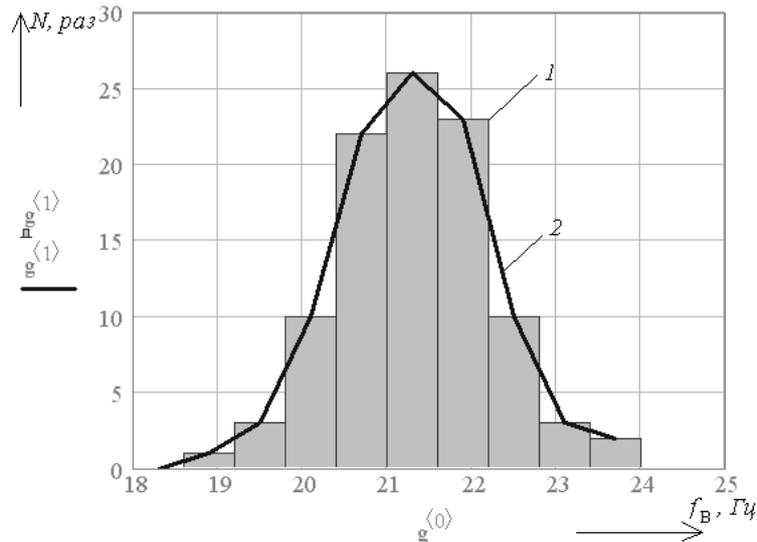


Рисунок П.6.5 – Гистограмма 1 и ломаная кривая 2 распределения верхней частоты ФНЧ

II этап. Статистическое исследование по методу Монте-Карло в системе MicroCAP.

Электрическая схема активного ФНЧ представлена на рисунке П.6.6.

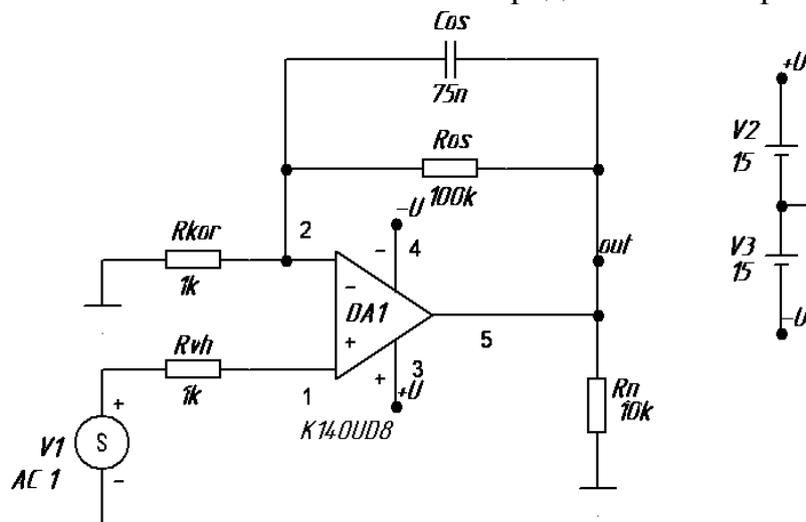


Рисунок П.6.6 – Типовая схема активного ФНЧ

В схеме используются модели резистора MY_RES и конденсатора MY_CAP, в которых указан технологический разброс параметров:

.MODEL MY_RES RES (R=1 LOT=10%)

.MODEL MY_CAP CAP (C=1 LOT=10%)

В диалоговом окне глобальных настроек Global Settings установлено значение стандартной меры отклонения $SD = 3$, найденное в начале I этапа. ЛАЧХ фильтра при номинальных значениях сопротивления и емкости элементов R_{OC} и C_{OC} представлена на рисунке П.6.7. Диапазон частот от 1 Гц до 17 кГц; количество расчетных точек – 1401.

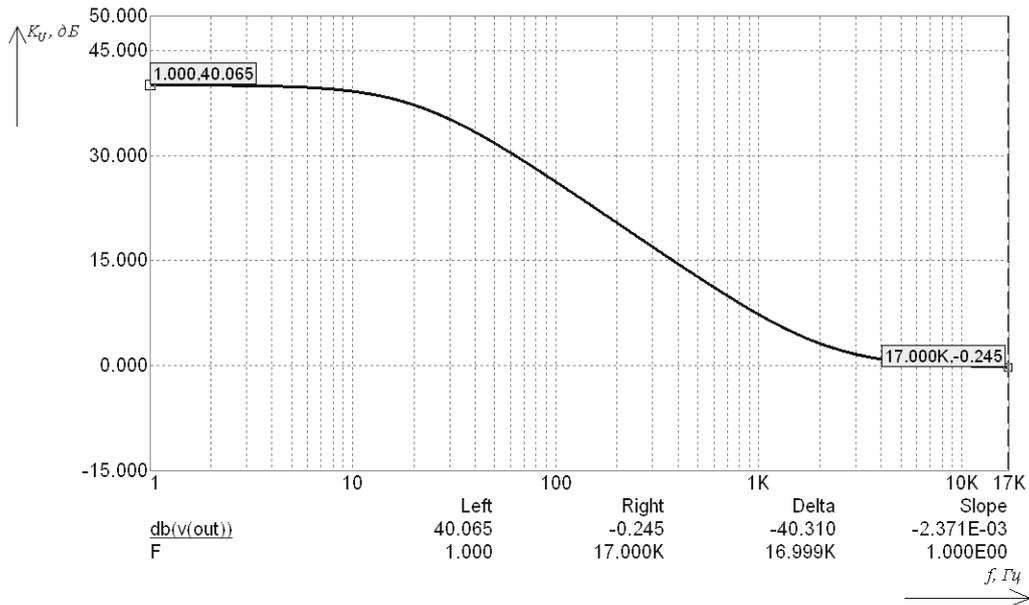
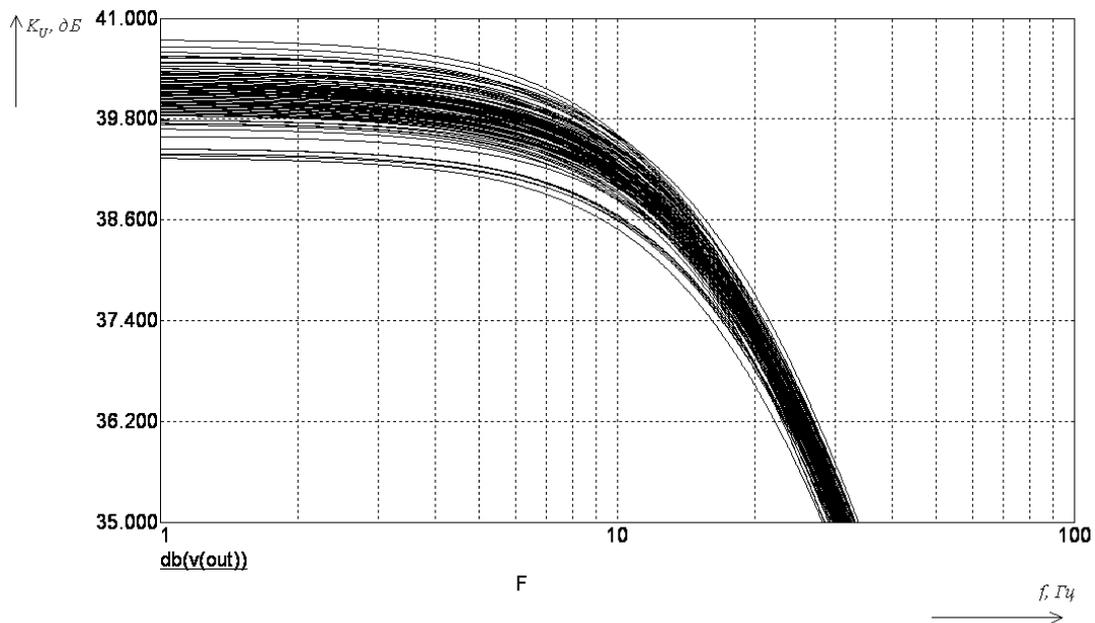


Рисунок П.6.7 – ЛАЧХ фильтра при номинальных значениях R_{OC} и C_{OC}

На рисунке П.6.8 представлен результат моделирования по Монте-Карло в системе MicroCAP. Закон распределения технологического разброса параметров элементов R_{OC} и C_{OC} – нормальный. Количество реализаций – 100.



**Рисунок П.6.8 – Семейство ЛАЧХ ФНЧ
(увеличенный фрагмент НЧ области)**

Словесное описание целевой функции: нахождение верхней частоты полосы пропускания ФНЧ, измеренной по уровню -3 дБ от максимального коэффициента передачи.

Последовательность действий: для каждой характеристики семейства ЛАЧХ требуется сначала найти ординату точки максимума функции, затем определить ординату, меньшую на 3 единицы. Соответствующая этой ординате абсцисса является верхней частотой полосы пропускания.

Техническая реализация: по команде *Monte Carlo/Histograms/Add Histograms...* составляется целевая функция с использованием двух вложенных друг в друга шаблонов *X_Level* и *High_Y*:

$$\mathbf{X_Level(db(v(out)),1,1,High_Y(db(v(out)),1)-3)}$$

Помимо гистограммы с вычисленным по правилу Старджесса количеством интервалов $int = 8$, были построены также гистограммы с количеством интервалов 9, 10 и 11. Сравнительный анализ показал, что наибольшее соответствие теоретической кривой плотности нормального распределения имеет гистограмма с количеством интервалов $int = 8$. Этот вариант гистограммы представлен на рисунке П.6.9.

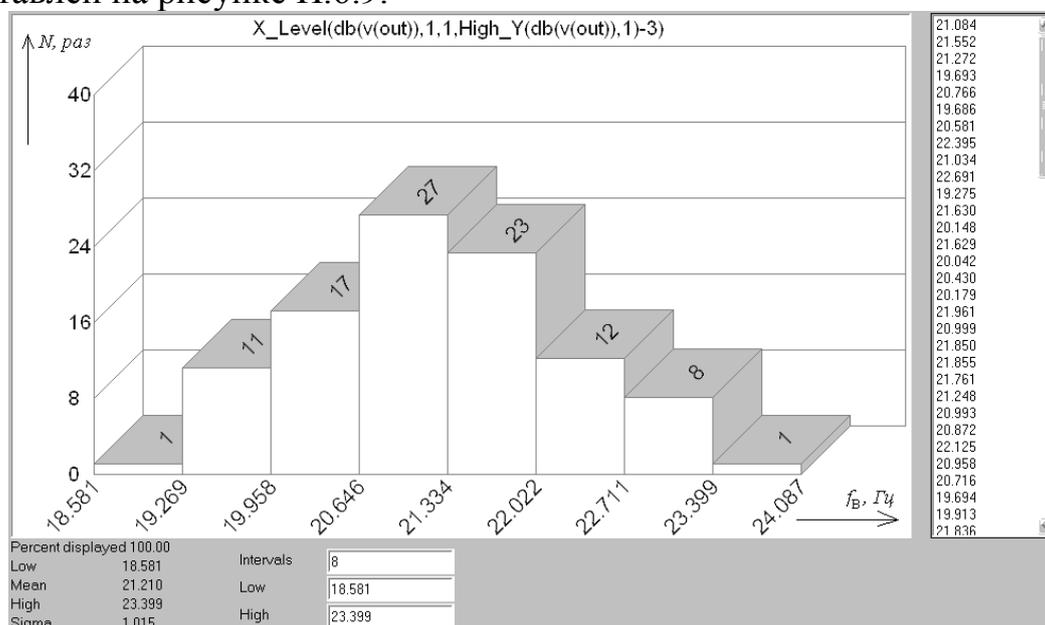


Рисунок П.6.9 – Гистограмма распределения верхней частоты ФНЧ

Сводные числовые характеристики распределения верхней частоты ФНЧ представлены в таблице П.6.1.

	НАИМЕНЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ	НАИБОЛЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	СРЕДНЕКВАДРАТИЧ ОТКЛОНЕНИЕ
MathCAD	18.986	21.364	23.901	0.891
MicroCAP	18.581	21.210	23.399	1.015

Выводы:

1. Полученные в системе MathCAD и MicroCAP гистограммы распределения близки к теоретическому виду кривой плотности нормального распределения.

2. Соответствующие статистические оценки в таблице П.6.1 согласуются между собой, что говорит об адекватности проведенного исследования.

3. В ходе проведенного исследования подтверждена справедливость центральной предельной теоремы. Наличие в схеме активного ФНЧ двух независимых нормально распределенных параметров (сопротивление и емкость частотно-задающей цепи) приводит к нормальному распределению выходного параметра всего устройства – верхней частоты полосы пропускания.

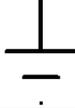
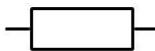
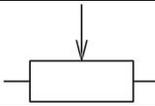
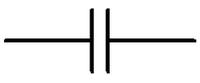
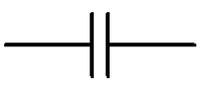
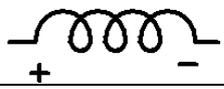
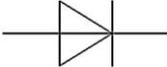
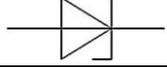
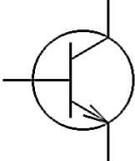
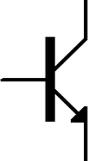
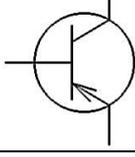
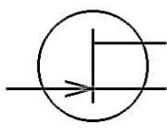
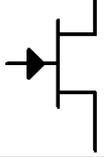
Ответы на контрольные вопросы

1. Как формулируется центральная предельная теорема для одинаково распределенных слагаемых? Если X_1, X_2, \dots, X_n – независимые случайные величины, имеющие одно и то же распределение с математическим ожиданием m и дисперсией σ^2 , то при увеличении n закон распределения суммы случайных величин неограниченно приближается к нормальному.

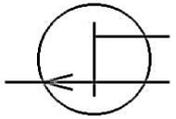
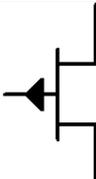
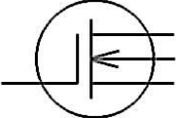
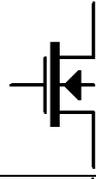
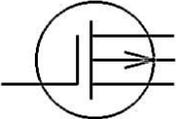
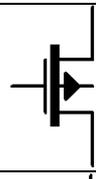
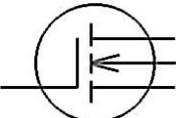
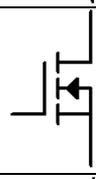
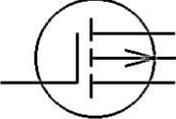
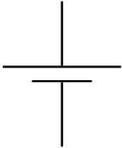
2.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – СООТВЕТСТВИЕ УСЛОВНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ЭРЭ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Таблица

Название ЭРЭ	Обозначения, принятые в ЕСКД		Обозначения, принятые в MicroCAP	
	Символ позиционного обозначения	Условное графическое обозначение	Символ позиционного обозначения	Условное графическое обозначение
Общий проводник	---		---	
Резистор постоянный	<i>R</i>		<i>R</i>	
Резистор переменный	<i>R</i>		<i>R</i>	
Конденсатор постоянный	<i>C</i>		<i>C</i>	
Конденсатор постоянный поляризованный	<i>C</i>		<i>C</i>	
Катушка индуктивности	<i>L</i>		<i>L</i>	
Диод выпрямительный	<i>VD</i>		<i>D</i>	
Стабилитрон	<i>VD</i>		<i>D</i>	
Биполярный транзистор <i>n-p-n</i>	<i>VT</i>		<i>Q</i>	
Биполярный транзистор <i>p-n-p</i>	<i>VT</i>		<i>Q</i>	
Полевой транзистор с <i>p-n</i> переходом и <i>n</i> -каналом	<i>VT</i>		<i>J</i>	

Окончание таблицы

Название ЭРЭ	Обозначения, принятые в ЕСКД		Обозначения, принятые в MicroCAP	
	Символ позиционного обозначения	Условное графическое обозначение	Символ позиционного обозначения	Условное графическое обозначение
Полевой транзистор с p - n переходом и p -каналом	VT		J	
МДП-транзистор с встроенным n -каналом	VT		M	
МДП-транзистор с встроенным p -каналом	VT		M	
МДП-транзистор с индуцированным n -каналом	VT		M	
МДП-транзистор с индуцированным p -каналом	VT		M	
Элемент питания	GB		V	