задание на дипломную работу

реферат

Рассматривается модель переизлучающей системы в виде электрического вибратора, параллельно входным зажимам которого включён нелинейный элемент, осуществляющий модуляцию переизлучённой волны в соответствии с законом изменения модулирующего напряжения, приложенного к этому нелинейному элементу.

В качестве нелинейного элемента, в первом случае, используется полупроводниковый диод, моделью которого является нелинейный резистор, во втором – варикап, упрощенной моделью которого является нелинейная ёмкость. Наличие нелинейного элемента, в общем случае, приводит к появлению в вибраторе токов высших гармоник падающей волны, что приводит к излучению на кратных частотах модулированных сигналов.

Задачей анализа является нахождение токов основной и высших гармоник вибратора, позволяющих рассчитать параметры модуляции, как первой, так и высших гармоник тока, а также средние амплитуды напряжённости поля в точке приёма каждой из гармоник.

Для выполнения анализа предложена модель вибратора в виде электрической цепи. Эта модель справедлива, в первом приближении, как для основной, так и для высших гармоник тока вибратора. Таким образом, электродинамическая задача сводится к задаче анализа нелинейной электрической цепи, решение которой предполагается выполнить с применением ПЭВМ.

Содержание

задание на дипломную работу 2

реферат 3

Содержание 4

ВВЕДЕНИЕ 5

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ – МОДУЛЯТОРА. 7

1.1. Физические принципы работы 8

1.2. Некоторые сведения о работе сотовой связи GSM. Основные параметры зондирующего сигнала 8

1.3. Основные параметры модулирующего сигнала 9

2. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ 11

2.1. Распределение тока по вибратору 11

2.2. Расчёт входного сопротивления вибратора 12

2.3. Диаграмма направленности симметричного вибратора 16

2.4. Схема замещения нелинейного резистора 19

2.5. Схема замещения нелинейной ёмкости 19

3. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖАТЕЛЯ – МОДУЛЯТОРА 20

3.1. Построение математической модели вибратора 22

3.1.1. Анализ возможного вида схемной функции 22

3.1.2. Построение схемной функции 24

3.1.3. Нахождение коэффициентов схемной функции 25

3.1.4. Синтез электрической цепи 25

3.2. Составление математической модели модулирующей части 26

3.3. Построение общей математической модели отражателя – модулятора 27

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДУЛЯТОРА НА ДИОДЕ 28

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НА ПЭВМ 34

5.1. Исходные данные для программы 34

5.2. Схема эксперимента 35

5.3. Блок-схема программы 35

5.4. Результаты работы программы 36

6. РАСЧЁТ МОЩНОСТИ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ ПРИЁМНОЙ АНТЕННЫ 38

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 40

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 42

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Основные расчётные формулы для вычисления коэффициентов. 43

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. 44

перечень документов дипломной работы 74

ВВЕДЕНИЕ

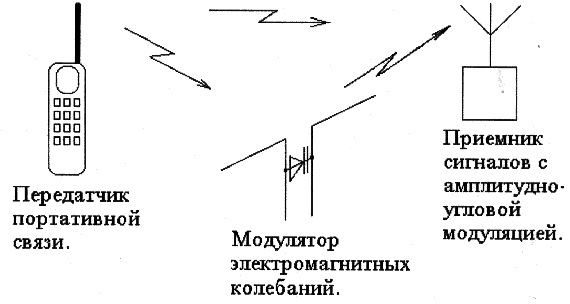
Информация – это, во-первых, знание относительно нового типа, пригодное для дальнейшего использования, во-вторых, знание, производство, хранение и применение которого действительно становится всё более важной для общества, деятельность которого порождает соответствующие ему технико-организационные структуры. Одной из таких структур являются организации, занимающиеся несанкционированным получением информации, с целью извлечения прибыли, т.е. шпионажем.

На органы разведки возлагаются задачи по контролю за соблюдением государственных и военных тайн, выявлению незаконной экономической практики и действий, наносящих ущерб государственным интересам, выполнению экономических соглашений, по оценке запасов сырьевых ресурсов, возможных прорывов в технологии.

Аналогично разведслужбам сбором информации, только в более скромных масштабах, занимаются практически все корпорации, так как это является непременным условием их выживания в жёсткой конкурентной борьбе.

Целью данной работы является моделирование системы перехвата речевой информации с помощью отражателя – модулятора, которая реально используется или может быть использована в России.

Система является полуактивным отражателем – модулятором, работающим на частотах портативных абонентских станций сотовой связи. Основой системы является полуволновой вибратор (для зондирующего сигнала), в котором параллельно зажимам подключён варикап или диод, с параллельно или последовательно включённым микрофоном (рис 1.1). Напряжение с микрофона меняет ёмкость варикапа или сопротивление диода, тем самым, изменяя входное сопротивление вибратора, следовательно, амплитуду и фазу отражённой волны при зондировании вибратора внешним электромагнитным полем. Размеры вибратора и параметры согласующих элементов системы подобраны, таким образом, что вся система резонирует на внешнее излучение частот сотовых станций и кратных им.



**Рис 1.1.** Структура системы перехвата.

Главное достоинство такого вида модулятора – невозможность обнаружения при отсутствии внешнего облучения.

В соответствии с постановкой задачи необходимо рассчитать зависимость параметров модуляции отражённого сигнала на кратных гармониках от мощности зондирующего сигнала как функцию расстояния от источника зондирующего сигнала до вибратора и от вибратора до приёмника. При этом необходимо учесть возможность экранировки пространства между источником зондирующего сигнала и отражателем – модулятором.

# ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ – МОДУЛЯТОРА.

Отражатель – модулятор, в том или ином исполнении, используется достаточно давно для перехвата речевой информации. Принцип работы основан на зависимости параметров нелинейного элемента от состояния воздушной среды, которое в свою очередь определяется наличием в окружающем пространстве звуковых волн. С помощью звуковых волн люди общаются между собой, поэтому именно в канале связи «человек – воздушное пространство - человек» происходит перехват информации с помощью отражателя - модулятора.

Отражатель – модулятор (закладка) размещается в помещении, где происходят интересующие разведывательную сторону разговоры. При этом закладка может быть специально создана, или представлять собой устройство, непреднамеренно расположенное в помещении, с ярко выраженной нелинейностью, параметры которой значительно зависят от звуковых колебаний, например, радиоприёмник с воздушным конденсатором.

Почему отражатель – модулятор получил широкое применение при несанкционированном доступе к речевой информации? Наверное, первое его достоинство состоит в возможности съёма информации с помещения, куда нет прямого доступа, а с помощью высокочастотного навязывания этот доступ получить можно. В этом случае мы видим пример использования какого-либо предмета или устройства в качестве отражателя модулятора. Бывают случаи, когда мы всё-таки можем получить доступ на короткий промежуток времени, тогда появляется случай сделать в помещении ранее изготовленную закладку. Эта закладка обладает преимуществом, поскольку её параметры соответствуют оптимальным для перехвата.

С развитием этой области, подобной утечке информации появились адекватные меры противодействия, из-за её плохой скрытности, связанной с необходимостью значительного облучения помещения высокочастотным сигналом (зондирующий сигнал). Зондирующий сигнал может быть легко обнаружен стандартными методами регистрации электромагнитного поля. Обеспечить необходимую скрытность помогло предложение, заключающиеся в применении электромагнитных волн, используемых в системах сотовой связи, в качестве зондирующего сигнала.

## Физические принципы работы

Рассмотрим физические принципы работы отражателя – модулятора.

Специально созданная закладка представляет собой антенну – вибратор, к входным зажимам которого подключен нелинейный элемент (варикап, диод и т.п.) и микрофон или стетоскоп. Электродвижущая сила, возникающая на концах микрофона или стетоскопа, меняет параметры нелинейного элемента.

Подразумевается, что входное сопротивление закладки согласовано на частоте зондирующего сигнала с сопротивлением модулирующего звена. Это условие является необходимым для максимальной передачи энергии зондирующего сигнала, в энергию отражённых сигналов с частотами, кратными частоте зондирующего. Итак, закладка облучается высокочастотным гармоническим сигналом, поскольку её сопротивление согласовано с сопротивлением модулирующей части, то половина энергии падающей электромагнитной волны, остаётся в вибраторе (антенне), т.е. излучается обратно, а вторая половина поглощается в модулирующей части [1].

Главным элементом модулирующей части является нелинейность. Из теоретических основ радиотехники известно, что при прохождении гармонического сигнала через нелинейную цепь, спектр выходного сигнала обогащается гармониками, с частотами кратными входному. В модулирующей части появляются гармоники основной частоты, причём, если параметры нелинейного элемента зависят от состояния внешнего воздушного пространства, то и параметры этих гармоник (амплитуда и фаза) зависят от звуковых колебаний распространяющихся в воздушном пространстве. Поскольку модулирующая часть представляет собой двухполюсник, то токи с кратными частотами начинают протекать в вибраторе. Отсюда следует, что токи частот, кратных основной (и чьи параметры зависят от звуковых колебаний, распространяющихся в подслушиваемом помещении), излучаются в свободной пространство, поэтому существует возможность их приёма и обработки.

## Некоторые сведения о работе сотовой связи GSM. Основные параметры зондирующего сигнала

В соответствии с рекомендацией СЕРТ 1980 г., касающейся использования спектра частот подвижной радиосвязи в диапазоне частот 890 – 960 МГц, стандарт GSM на цифровую общеевропейскую (глобальную) сотовую систему подвижной связи предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот: 890 – 960 МГц (для передатчиков подвижных станций - MS), 935 – 960 МГц (для передатчиков базовых станций - BTS).

В стандарте GSM выбрана гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (GMSK). Обработка речи осуществляется в рамках принятой системы прерывистой передачи речи (DTX), которая обеспечивает включение передатчика только при наличии речевого сигнала и отключение передатчика в паузах и конце разговора.

В табл. 1.1. сведены основные сведения о системе сотовой связи GSM [3].

**Таблица 1.1.** Основные характеристики стандарта GSM

|  |  |
| --- | --- |
| Частоты передачи подвижной станции и приёма базовой станции, МГц | 890 – 915 |
| Частоты приёма подвижной станции и передачи базовой станции, МГц | 935 – 960 |
| Дуплексный разнос частот приёма и передачи, МГц | 45 |
| Скорость передачи сообщения в радиоканале, кбит/с | 270, 833 |
| Ширина полосы канала связи, кГц | 200 |
| Максимальное количество каналов связи | 124 |
| Максимальное количество каналов, организуемых в базовой станции | 16 – 20 |
| Вид модуляции | GMSK |
| Индекс модуляции | ВТ 0,3 |
| Ширина полосы предмодуляционного гауссовского фильтра, кГц | 81,2 |
| Количество скачков по частоте в секунду | 217 |
| Временное разнесение в интервалах TDMA кадра (передача/приём) для подвижной станции | 2 |
| Вид речевого кодека | PRE/LTP |
| Максимальный радиус соты, км | До 35 |

## Основные параметры модулирующего сигнала

Для исследования отражателя - модулятора речевой сигнал (модулирующее колебание) берётся в виде гармонического колебания с частотой 3 кГц. Это обусловлено отсутствием применения каких-либо особенностей человеческой речи при перехвате информации данным способом.

# ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ

Для моделирования отражателя – модулятора необходимо проанализировать литературу по этой теме. Из-за закрытости этой темы, литературу на прямую связанную с ней, найти трудно, поэтому приходится рассматривать моделирование элементов отражателя- модулятора по отдельности. Первый элемент, который мы рассмотрим, будет симметричный вибратор.

## Распределение тока по вибратору

Все основные характеристики симметричного вибратора определяются размерами провода вибратора и распределением тока вдоль него. Поэтому расчёт симметричного вибратора начинается с выяснения закона распределения тока.

Задача о нахождении точного значения тока на вибраторе имеет историю, исчисляемую десятилетиями. Тем не менее, до сего времени эта задача до конца не решена, хотя получен ряд хороших приближений.

Однако при решении большинства практических задач знания точного решения не требуется. Необходимые данные о параметрах симметричного вибратора могут быть получены инженерным методом при использовании приближённого выражения функции распределения тока.

Общепринятый инженерный метод предполагает, что симметричный вибратор в отношении распределения тока представляет собой двухпроводную линию с потерями, ненагруженную на конце (холостой ход). Многочисленные экспериментальные данные и опыт проектирования антенн типа «симметричный вибратор» подтверждают правильность такого подхода. Поэтому независимо от угла раствора проводов вибратора распределение тока и напряжения принимается в виде стоячей волны соответственно с нулём и максимумом на свободных концах вибратора. Причём в силу потерь на излучение в узлах стоячих волн ток и напряжение не достигают нулевого значения.

Что касается тепловых потерь в скин–слое вибратора, то они обычно в сравнении с потерями на излучение малы и не вносят сколь-нибудь заметного дополнительного затухания.

Таким образом, распределение тока вдоль вибратора записывается в виде:



где γ=α-*i*β - постоянная распространения волны тока вдоль провода эквивалентной двухпроводной линии;

l – длина одного плеча вибратора;

In – ток в пучности стоячей волны, связанный с током на входе вибратора I0 соотношением:

*I0=Insinγl*, (2.2).

Из теории длинных линий известно, что фазовая постоянная α и коэффициент затухания β определяются формулами:



где *R1, L1, C1* – соответственно погонные сопротивления полезных и тепловых потерь, индуктивность и ёмкость линии.

## Расчёт входного сопротивления вибратора

Способность антенны излучать оценивается по так называемому сопротивлению излучения *RΣ*. Оно представляет собой отношение полной излучённой мощности *РΣ* к квадрату тока в антенне. Чем больше оказывается излучённая мощность при фиксированной величине тока, тем больше излучающая способность антенны и тем больше её *RΣ*. Антенна с хорошей излучающей способностью может излучить ту же мощность, но при меньших значениях тока, чем в антенне с плохой излучающей способностью.

Сопротивление излучения определяется формулой:

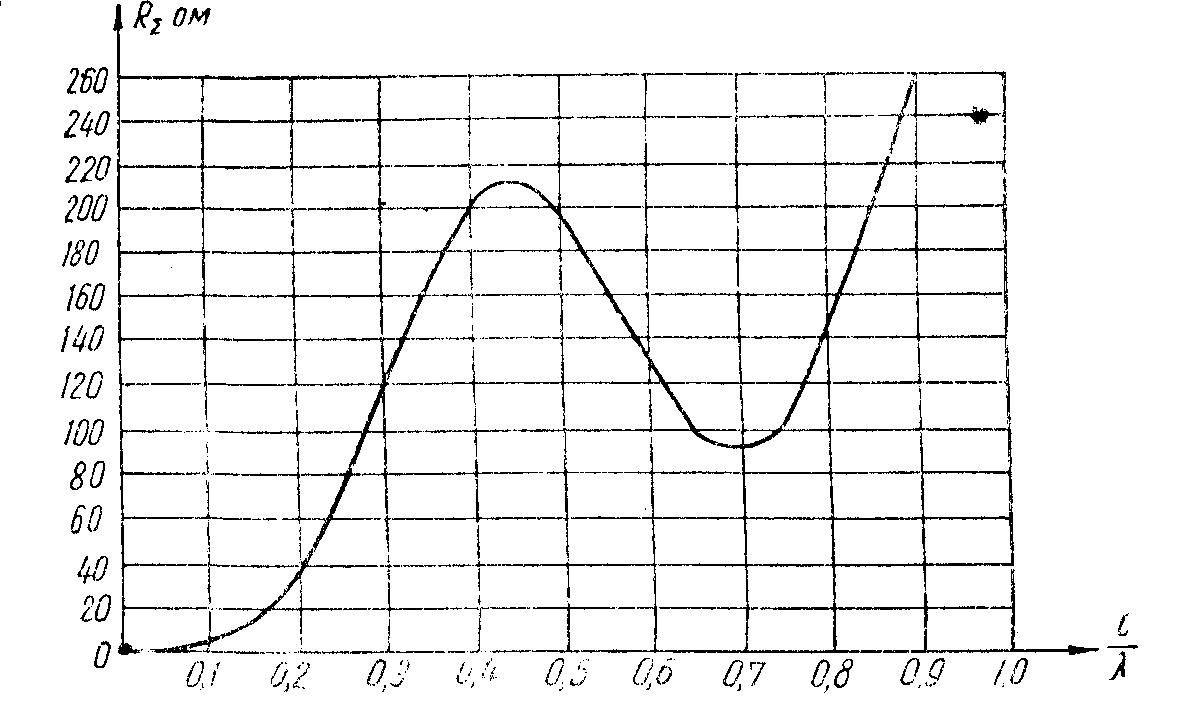
, (2.6)



Расчётная формула *RΣ* для симметричного вибратора сложна и мало пригодна для инженерных расчётов. Это связано со сложностью интегрирования вектора Пойнтинга по сферической поверхности даже в тех случаях, когда подынтегральная функция, пропорциональная квадрату диаграммы направленности, сравнительна проста. Поэтому на практике пользуются готовым результатом расчёта (см. табл.2.1. и рис 2.1).

**Таблица 2.1.** Значения сопротивления излучения.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| l/λ | RΣП,Ом | l/λ | RΣП,Ом | l/λ | RΣП,Ом |
| 0,125 | 6,4 | 0,325 | 144 | 0,525 | 185 |
| 0,150 | 13 | 0,350 | 168 | 0,550 | 166 |
| 0,175 | 23 | 0,375 | 187 | 0,575 | 145 |
| 0,200 | 36 | 0,400 | 200 | 0,600 | 121 |
| 0,225 | 54 | 0,425 | 209 | 0,625 | 105 |
| 0,250 | 73,1 | 0,450 | 212 | 0,650 | 93 |
| 0,275 | 96 | 0,475 | 210 | 0,675 | 87 |
| 0,300 | 120 | 0,500 | 199 | 0,700 | 85 |



**Рис. 2.1.** Зависимость сопротивления излучения симметричного вибратора от его длины.

Входное сопротивление симметричного вибратора определяется через напряжение и ток на входе антенны. Поскольку мы считаем закон распределения тока и напряжения известным из теории длинных линий с потерями, то, очевидно, что для расчёта входного сопротивления мы должны использовать ту же самую теорию. Поэтому расчёт ведётся по известной формуле для длинной линии с затуханием:



где *WВ* – волновое сопротивление эквивалентной двухпроводной линии, заменяющей собой вибратор;

*l* – длина эквивалентной линии, равная длине одного плеча вибратора;

*β* и *α* - составляющие постоянной распространения в эквивалентной линии;

Надо сказать, что эквивалентное волновое сопротивление вибратора *WВ* не совпадает с волновым сопротивлением *W* линии, выполненной из тех же проводов, что и вибратор. Известно, что волновое сопротивление линии с распределёнными параметрами определяется отношением погонной индуктивности и ёмкости (2.5) в предположении, что *L1* и *C1* постоянны на всём рассматриваемом участке линии. Но в симметричном вибраторе погонные *L1* и *C1* изменяются вдоль провода, и их отношение не обязательно должно оставаться постоянным. Поэтому при расчёте симметричного вибратора используется некоторое эффективное (усреднённое) волновое сопротивление, обозначенное через *WВ*. В силу того, что распределение *L1* и *C1* по вибратору зависит от его длины, значение *WВ* также оказывается зависящим от длины вибратора и равным:

(2.8)



где *d* – диаметр провода вибратора.

Постоянная распространения γ=α-*i*β также определяется через эффективные распределённые параметры по формулам, аналогичным (2.3)-(2.5):

где



Точность равенства (2.10) зависит от величины коэффициента затухания *β* или точнее от отношения *2β/k*.

В случае симметричного вибратора активные потери определяются сопротивлением излучения, которое зависит только от длины вибратора, и в свободном пространстве не может быть изменено, если электрическая длина антенны фиксирована и мало меняется. Поэтому добротность эквивалентного контура может быть изменена только за счёт характеристического сопротивления, то есть за счёт реактивных элементов. Последние (2.5) связаны непосредственно с волновым сопротивлением *WВ* и, следовательно, с диаметром провода вибратора (2.8). Когда необходимо использовать симметричный вибратор в широкой полосе частот и требуется плавное и по возможности меньшее изменение *ZВХ* (малая добротность), прибегают к вибраторам со значительным поперечным сечением провода. При этом провод вибратора не обязательно должен быть круглым и сплошным, его можно выполнить из полой трубы или плоской ленты или аналогичных сетчатых металлических поверхностей.

## Диаграмма направленности симметричного вибратора

Диаграмма направленности симметричного вибратора может быть получена с помощью метода, имеющего большое значение в теории и технике антенн и применяющегося для получения диаграмм направленности любых антенн. Метод предполагает распределение комплексной амплитуды тока по антенне известным.



**Рис.2.2.** К выводу формулы поля симметричного вибратора.

В основе метода лежит принцип суперпозиции или наложения.

При выводе формулы диаграммы направленности антенна рассматривается как совокупность элементарных излучателей, поля от которых надлежит суммировать в текущей точке наблюдения, расположенной в дальней зоне на сферической поверхности радиуса r.

Разберём указанный метод и выведем формулу для диаграммы направленности симметричного вибратора.

На рис.2.2 показан тонкий вибратор с выделенными на нём двумя симметрично расположенными диполями длинной *dZ* с координатами центров *±Z*. Там же указана система координат для отсчёта положения точки наблюдения А и координат диполей с током.

Поскольку точка наблюдения отнесена в дальнюю зону, то есть на достаточно большое расстояние *r0*>>*2l*, то все лучи, направленные в точку наблюдения от различных диполей, можно считать практически параллельными. Это значит, что r0, r1 и r2 связаны между собой соотношениями:

*r2-Δr*=*r0*=*r1+Δr*, (2.12)

где

*Δr*=*|Z|cosθ.*

Запишем поле от двух выбранных диполей, считая их достаточно тонкими (диаметр провода значительно меньше длины волны):

, (2.13)



Сравнивая поля от двух противоположных элементарных вибраторов, видим, что они только отличаются значением множителя , то есть амплитудами, обратно пропорциональными расстояниями *r(Z)*, и фазами, прямо пропорциональными расстояниям:



*Ψ*=*k⋅r(z)*. (2.14)

При условии *r>>l* отличие амплитуд будет настолько несущественным, что с хорошей точностью модули полей от всех диполей можно определять через одно и то же расстояние r0, соответствующее середине симметричного вибратора.

Однако при оценке фазовых сдвигов полей с различием расстояний *r1* и *r2* нельзя не считаться.

С учётом принятых допущений поле от пары диполей записывается в виде:

, (2.15)



Чтобы получить значение полного поля и диаграммы направленности симметричного вибратора, необходимо просуммировать *dEθ* от всех пар симметрично расположенных диполей, составляющих оба провода антенны.

Сложение бесконечного числа элементарных полей осуществляется путём интегрирования выражения (2.15) в пределах одного плеча вибратора. Результирующее поле оказывается равным:

. (2.16)



В полученной формуле в квадратных скобках выделено произведение двух множителей, зависящих от *θ* и представляет собой диаграмму направленности в меридиональной плоскости *F(θ).* Каждому из множителей может быть приписан определённый физический смысл.

Ниже приведены графики для *F(θ)* при различных отношениях .



**Рис. 2.3.** Диаграмма направленности при l/λ=0,25.



**Рис. 2.4.** Диаграмма направленности при l/λ=0,5



**Рис. 2.5.** Диаграмма направленности при l/λ=0,75



## Схема замещения нелинейного резистора

Нелинейный резистор - элемент электрической цепи, напряжение и ток в котором связаны нелинейным законом. Для моделирования нелинейных резисторов в радиотехнике используются несколько методов, например, замена его на эквивалентный источник напряжения (тока), управляемого током (напряжением).

В нашем случае в качестве нелинейного резистора используется диод. Для моделирования диода будем использовать зависимость тока диода от напряжения *i*=*f*(U), приложенного к его концам, то есть, заменяем источником тока, управляемым напряжением. Эту зависимость запишем аналитически в виде *i*=*I0⋅eaU*, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. Кроме того, диод обладает паразитной индуктивностью выводов и паразитной ёмкостью корпуса. Паразитная ёмкость корпуса моделируется включением ёмкости соответствующего номинала параллельно источнику тока, а паразитная индуктивность включением эквивалентной индуктивности последовательно с ним.

## Схема замещения нелинейной ёмкости

Нелинейная ёмкость – элемент, ёмкость которого зависит от приложенного напряжения. В качестве нелинейной ёмкости берётся варикап. Поскольку варикап является диодом и включается в обратном смещении то считается, что его активное сопротивление равно бесконечности. Как и диод варикап обладает паразитной ёмкостью корпуса и паразитной индуктивностью выводов, которые моделируются аналогично паразитной ёмкости и индуктивности диода.

Получаем в качестве модели варикапа ёмкость, управляемую напряжением, с параллельно и последовательно включёнными паразитной ёмкостью и индуктивностью. Зависимость ёмкости от напряжения выражается следующей функцией:



где *СВ.НОМ* – ёмкость варикапа, приведённая в справочнике при напряжении смещения ЕВ.НОМ;

*ϕк* – контактная разность потенциалов для кремниевого варикапа равна 0,65.

m – коэффициент степени (для сплавных m=0.5, для диффузионных m=0.3)

# СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖАТЕЛЯ – МОДУЛЯТОРА

Математическая модель отражателя - модулятора необходима для моделирования этого устройства с помощью вычислительной техники. Предполагается, что все элементы математической модели будут представлены как совокупность элементарных пассивных элементов с постоянными или переменными параметрами. Эта модель позволит анализировать параметры отражателя – модулятора с помощью специальных программных продуктов, предназначенных для расчёта электрических цепей и схем.

Основной задачей моделирования является создание схемного аналога вибратора – антенны отражателя - модулятора, поскольку этот элемент устройства имеет большой разброс параметров для различных частот, а нам необходима общая модель для всего рабочего диапазона частот, который имеет коэффициент перекрытия три и более. Поэтому, разработке модели именно вибратора в данном разделе будет уделено особое внимание, поскольку задача является далеко не тривиальной, кроме того аналогичной задачи не рассматривалось ни в одной книге, просмотреной в ходе подготовке к дипломной работе. Разработанный мною метод моделирования может с успехом применяться для моделирования и других цепей, поскольку в ходе моделирования был использован общий подход.

Как было сказано выше, нам необходимо рассмотреть два случая, когда в закладке используется полупроводниковый диод и когда используется варикап. Использование этих двух элементов в устройстве даёт различные цепи согласования вибратора с самим модулятором. Ниже на рисунках представлены три эквивалентные цепные схемы для двух этих случаев.



**Рис. 3.1.** Эквивалентная схема отражателя - модулятора с использованием диода.

где

*Е1* – источник высокочастотных колебаний, навязанных зондирующим сигналом;

*ЕСМ* – источник смещения (устанавливает рабочую точку диода);

*UМОД* – источник модулирующего напряжения;

*Д1* – полупроводниковый диод;

*ССОГЛ* – ёмкость, компенсирующая реактивное сопротивление вибратора;

*LСОГЛ* – блокировочная или согласующая индуктивность, блокирует шунтирование высокочастотного сигнала через источник смещения и модуляции, или компенсирует ёмкостную составляющую (назначение в зависимости от схемы);

*ZВХ(p)* – эквивалентное сопротивление вибратора (его эквивалентная схема как двухполюсника);



**Рис. 3.2.** Эквивалентная схема отражателя - модулятора с использованием варикапа (*RСОГЛ* параллельно *Д1*).



**Рис. 3.3.** Эквивалентная схема отражателя - модулятора с использованием варикапа (*RСОГЛ* последовательно *Д1*).

На рис 3.2 и рис.3.3 *RСОГЛ* нужно для введения активного сопротивления, в полное сопротивление модулирующей части, это позволит согласовать модулирующую часть с вибратором на частоте зондирующего сигнала (*RСОГЛ* выбирают равной активной составляющей вибратора на частоте зондирующего сигнала).

Видно, что единственным неизвестным квадратом в нашей схеме является эквивалент вибратора, приступим к его разработке и моделированию.

## Построение математической модели вибратора

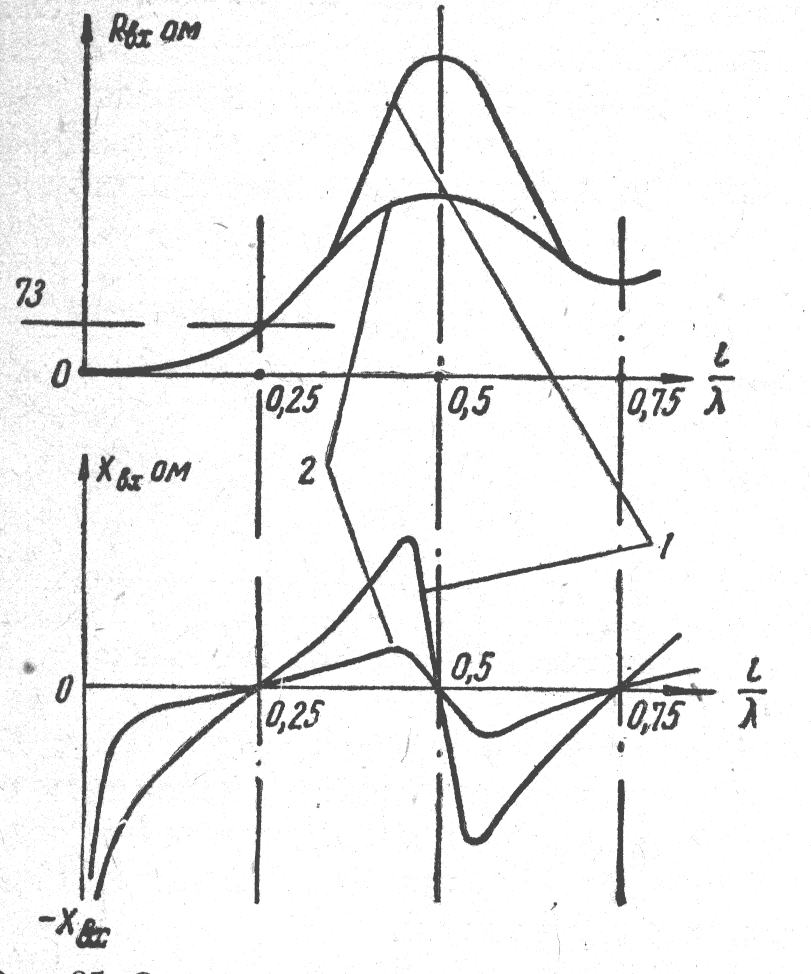
Как было сказано выше, математическую модель вибратора будем разрабатывать в виде электрической цепи. Поэтому сразу же накладывается требование положительности и вещественности схемной функции (в нашем случае входное сопротивление), которую мы будем строить для вибратора.

Вначале мы посмотрим на экспериментальные графики входного сопротивления вибратора, исходя из которых, выведем основные свойства для входного сопротивления вибратора. Далее, пользуясь теоретическими данными для схемных функций электрических цепей, построим функцию входного сопротивления вибратора, пользуясь этой функцией, проведём моделирование с помощью ЭВМ. Кроме того, покажем некоторый эвристический метод синтеза RLC – двухполюсников по известной схемной функции.

### Анализ возможного вида схемной функции

Из курса «Теория радиотехнических сигналов и цепей» известно, что RLC – двухполюсник имеет схемную функцию в виде рациональной дроби, степень знаменателя и числителя которой отличаются, не более чем на единицу, иначе импульсная характеристика цепи будет стремиться в бесконечность при конечной мощности входного воздействия. Кроме того, функция входного сопротивления или проводимости RLC – цепи имеет в числителе и знаменателе все степени. В некоторых случаях, когда полное сопротивление в нуле стремиться к нулю или бесконечности, может отсутствовать нулевая степень, т.е. нулевой коэффициент равен нулю.

Ниже на рис. 3.4 приведены экспериментальные графики для входного сопротивления вибратора [4]. На верхнем графике рисунка приведены зависимости активной части входного сопротивления от отношения длины вибратора к длине волны. Эта зависимость пропорциональна зависимости сопротивления от частоты при постоянной длине вибратора (частота обратно пропорциональна длине волны). На нижнем графике рисунка видим зависимость реактивной части сопротивления от частоты. Заметим, что на нулевой частоте (λ=∞) значение реактивной составляющей стремится в “минус” бесконечность, значит, у нас в знаменателе полного сопротивления отсутствует нулевая степень.



**Рис 3.4.** Зависимость входного сопротивления симметричного вибратора от его длины при различном волновом сопротивлении вибратора (см. главу 2.2): кривая 1 – для *WB1*; кривая 2 – для *WB2* , где *WB1* > *WB2* .

Видим, что первым на оси часто стоит последовательный резонанс, затем параллельный и т.д., т.е. вибратор обладает таким свойством RLC – цепи, как чередование нулей и полюсов. Понятие «полюс», в данном случае, подразумевает наличие параллельного резонанса, хотя реактивная составляющая и равна нулю на этой частоте (это связано с наличием потерь в вибраторе на излучение). Так как вибратор обладает свойством чередования нулей и полюсов, то мы можем записать схемную функцию RLC – цепи и, подбором коэффициентов её полиномов числителя и знаменателя, добиться приближения её параметров на частотах кратных частоте зондирующего сигнал к параметрам вибратора.

В дипломной работе рассматривается работа вибратора до третей гармоники зондирующего сигнала. По условию задачи, для частоты зондирующего сигнала вибратор является полуволновым, т.е. на частоте зондирующего сигнала работа вибратора аналогична работе последовательного контура, отсюда работа вибратора на второй и третей гармонике облучающего сигнала аналогична работе параллельного и последовательного контура соответственно.

Исходя из выше сказанного, делаем вывод, что наша схемная функция имеет два «нуля» на комплексной плоскости (плюс ещё два из-за комплексной сопряжённости, причём каждый нуль имеет вид: *((p-a)2+b2))*, один «полюс» на комплексной плоскости и один «полюс» в нуле. Под «полюсом» на комплексной плоскости понимается наличие параллельного резонанса (системная функция в этой точке имеет конечное значение), под «нулём» - наличие последовательного резонанса.

Следовательно, требуемая схемная функция будет иметь в числителе полином четвёртого порядка, а в знаменателе полином третьего порядка, у которого будет отсутствовать свободный член.

### Построение схемной функции

В предыдущем подразделе мы выяснили, какой вид должна иметь схемная функция RLC – двухполюсника, имеющей два последовательных резонанса, один параллельный, и в нуле эквивалентна ёмкости:

, (3.1)



Получили восемь неизвестных коэффициентов, которые необходимо найти. Кроме того, можно показать, что любой RLC – двухполюсник, не имеющий перекрёстных связей, имеет функцию сопротивления или проводимости вида (3.1), у которой коэффициенты *a0=b0=1*. Отсюда, имеем шесть неизвестных коэффициентов, для нахождения которых нам потребуется шесть уравнений. Предложим следующий вариант системы уравнений, из которой можно найти коэффициенты (3.1).

Найдём активные и реактивные составляющие сопротивления (3.1) на трёх гармониках и при равняем их составляющим сопротивления вибратора на этих же гармониках. Получается, что мы провели кривую, заданную выражением (3.1), через три точки полного сопротивления вибратора. Эти точки возьмём на частотах кратных частоте облучающего сигнала. Таким образом, мы гарантировано имеем те же значения сопротивления (3.1) на требуемых частотах.

### Нахождение коэффициентов схемной функции

Нахождение коэффициентов схемной функции проводилось с использованием математического пакета MathCAD 7.0 Profeessional. Этот программный продукт имеет широкие возможности аналитической математики (в MathCAD она называется символьной), которая позволяет решать системы уравнений аналитическим путём, т.е. выдаёт конкретную формулу для нахождения переменной.

В ПРИЛОЖЕНИИ 1 приводятся формулы, которые были получены при помощи MathCAD, конечно же, они на первый взгляд выглядят громоздкими, но зато позволяют нам найти коэффициенты для любой совокупности реактивных и активных составляющих, не прибегая к численным методам.

Более того, эти формулы можно использовать для моделирования вибратора при помощи пользовательских программ, что является огромным «плюсом» в области исследований.

Ниже будет рассказано о том, как формулы для нахождения коэффициентов полинома использовались для моделирования всего отражателя – модулятора.

### Синтез электрической цепи

Пока не существует канонического метода для синтеза эквивалентной электрической RLC-цепи по заданной схемной функции (полного входного сопротивления в нашем случае) без использования «идеального» трансформатора, поэтому мною предложен следующий «эвристический» метод синтеза схемного эквивалента вибратора. Идея метода заключена в том, чтобы последовательно в «бесконечности» выделять эквивалентное RL-сопротивление или RC-проводимость, при проведении этой процедуры получается разложение схемной функции цепи в цепную дробь. Таким образом, получаем лестничную цепь, у которой в продольных «ветвях» находятся индуктивность и сопротивление, в поперечных – ёмкость и проводимость. Ещё раз хочу отметить, что подобный подход строго не обоснован с точки зрения математики, а является эвристическим. Автору пришлось просидеть не мало часов за листами бумаги, рисуя различные схемы, выводя их схемные функции, синтезируя их этим методом, и, потом, у полученных схем снова выводить выражение для полного сопротивления. И ни разу этот метод не подвёл, т.е. всегда синтезированные схемы имели положительные номиналы элементов. Впрочем, для моделирования при помощи ЭВМ не требуется положительность этих номиналов, это требуется только при натурном моделировании, и то, в некоторых случаях, отрицательные параметры элементов удаётся реализовать при помощи специальных устройств. Для доказательства справедливости этого метода, необходимо показать, что при условии положительности и вещественности исходной схемной функции, она раскладывается в цепную дробь, причём на каждом шаге мы получаем полином первой степени с положительными коэффициентами и рациональную дробь, обладающую свойством положительности вещественности. При моделировании на компьютере, если графики активного и реактивного сопротивления модели вибратора качественно были такими же, что и экспериментальные, то синтезированная цепь имела положительные номиналы своих элементов.

## Составление математической модели модулирующей части

Из рис. 3.1 – 3.3 видно, что модулирующая часть состоит в общем случае из *RСОГЛ*, *LСОГЛ*, *CСОГЛ*, источников смещения и модулирующего напряжения и нелинейного элемента.

Все эти элементы легко реализуются при помощи ЭВМ, и не представляется особой сложности для составления их дискретной модели. Параметры же нелинейных элементов вычисляются в конце шага, в соответствии с выражениями, приведёнными в главе 2.4 и 2.5, и на протяжении всего следующего шага считаются постоянными.

## Построение общей математической модели отражателя – модулятора

При переходе от непрерывной модели элементов к дискретной использовался метод Тастина, с которым можно познакомиться в [2], [6] и [9], причём согласующая ёмкость была введена в модель вибратора. Коэффициенты схемной дискретной функции для реализации этого метода были получены при помощи математического пакета MathCAD 7.0 Professional.

Для нахождения параметров модуляции нам необходимо знать ток в эквиваленте симметричного вибратора. Для этого мы должны определить напряжение на нелинейном элементе, затем, зная разность потенциалов, приложенную к зажимам модели вибратора, мы можем определить ток в ней. Для этого реализуем следующую схему работы алгоритма моделирования:

* на первом шаге напряжение на нелинейном элементе приравниваем напряжению смещения;
* определяем ток в модели вибратора (согласующей ёмкости) и ток в согласующей катушке индуктивности;
* находим ток в нелинейном элементе;
* определяем напряжение на нелинейном элементе;
* вычисляем параметр нелинейного элемента (напряжение - для диода, ёмкость – для варикапа);
* переходим на новый шаг;

Именно эта схема работы заложена в моделирующую программу. Как будет показано ниже, она приведёт нас к хорошим результатам.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДУЛЯТОРА НА ДИОДЕ

Поставленная задача анализа относится к классу нелинейных задач электродинамики, и её решение требует наличие достаточно мощных вычислительных средств. В то же время существует ряд приближённых методов анализа, позволяющих найти приемлемое решение, не прибегая к значительным затратам физического и машинного времени. Одним из них является квазилинейный метод, обычно применяемый для анализа нелинейных цепей при квазигармоническом характере протекающих в них токах и напряжениях [5], [7].

Суть метода заключается в том, что при определённых условиях ток или напряжение в нелинейной цепи может считаться периодическим процессом. В радиотехнических цепях основанием для такого допущения является наличие колебательных цепей в составе анализируемой цепи или системы. Периодический характер процесса, например тока в нелинейной цепи, позволяет представить его разложением в ряд Фурье:

*i(t)=I0+I1cos(ω0t+ϕ0)+I2cos(2ω0t+2ϕ0)+…*, (4.1)

где *Ik* – амплитуда k- ой гармоники тока;

*I0* – постоянная составляющая;

*ω0* – частота первой гармоники;

*ϕ0* – её начальная фаза.

Полагая, что ток вызывается некоторым воздействием, например, напряжением

*U(t)=U0cos(ω0t+ϕ0)*, (4.2)

можно записать между амплитудами воздействия и отклика в виде:

*Ik(U0)=Yk(U0)U0*, (4.3)

где *Yk(U0)* – проводимость нелинейной цепи по k – ой гармонике, зависящая от амплитуды воздействия.

Подобная зависимость может быть записаны и для постоянной составляющей, и для амплитуды какой-либо высшей гармоники. При этом зависимость проводимости от амплитуды воздействия, естественно, выражается другой функцией. Если фазовый сдвиг тока не совпадает с фазовым сдвигом входного напряжения (цепь является инерционной), то проводимость, связывающая комплексные амплитуды тока и напряжения, также является комплексной.

Таким образом, наличие нелинейного элемента («безынерционного» полупроводникового диода или варикапа) в составе модулятора – отражателя может быть учтено применением квазилинейного метода.

Основная задача расчёта – анализ тока в схемном эквиваленте вибратора, к которому последовательно подключён диод, а на диод подано модулирующее напряжение (рис 3.1). Это необходимо для определения параметров модуляции тока вибратора и создаваемого им поля в точке приёма.

В цепи действуют три источника напряжения – ЭДС высокочастотного колебания *Е1*, навязанного внешним полем, ЭДС модулирующего процесса *UМОД* и постоянная ЭДС смещения *ЕСМ*. Значения параметров ЭДС модулирующего процесса *UМОД* и смещения *ЕСМ* определяются внешними источниками соответствующих напряжений. Амплитуда *Е0* гармонической ЭДС *Е1=Е0cos(ω0t+ϕ0)* может быть рассчитана по формуле:

(4.4)



где hД – действующая высота вибратора;

*PT,GT* – мощность передатчика и коэффициент направленного действия его антенны;

*W=120π* - волновое сопротивление свободного пространства;

*R* – расстояние от передатчика до вибратора;

- отношение потоков мощности поступающего на экран сигнала и сигнала, прошедшего через экран – коэффициент экранировки.



Равенство (4.4) предполагает нахождение точки приёма в дальней зоне, хотя в реальном случае она может находиться и в ближней зоне. Очевидно, что для ближней зоны равенство (4.4) не справедливо. Для полуволнового вибратора действующая высота равна , где λ - длина волны.



Мощность передатчика, излучающего зондирующий сигнал, в (4.4) берётся в ваттах, тогда результат выражается в вольтах.

В качестве примера рассчитаем значение амплитуды наведённой ЭДС при облучении вибратора сигналом передатчика с расстояния R, при напряжение λ=0,3м, мощности РТ=1Вт и РТ=4Вт, КЭ=GT=1.



**Рис.4.1.** Зависимость амплитуды *Е0*, ЭДС высокочастотного колебания *Е1*, навязанного внешним полем, от расстояния R.

При R=10м и РТ=1Вт *Е0*=0,074В. Приведённый пример показывает, что амплитуда наведённой ЭДС невелика, и при не больших значениях *UМОД* возможна аппроксимация вольтамперной характеристики диода полиномом четвертого порядка:

*i(t)≈a1U(t)+a2U 2(t)+a3U 3(t)+a4U 4(t)*, (4.5)

где *a1, a2, a3, a4* – коэффициенты аппроксимирующего полинома;

*U(t)* – напряжение на диоде.

Применяя квазилинейный метод, полагаем

*U(t)=ЕСМ+UМОД(t)+Е0cos(ω0t)* (4.6)

и находим значения для токов второй и третей гармоники:

, (4.7)



, (4.8)



где *U-=ЕСМ+UМОД(t)*.

Дальнейшее выделение из (4.7) и (4.8) коэффициента модуляции М даёт следующий результат:

, (4.9)



, (4.10)



где

, (4.11)



, (4.12)



, (4.13)



*М2* – коэффициент модуляции для тока второй гармоники;

*М3* – коэффициент модуляции для тока третей гармоники;

*δ2* – относительный уровень нелинейности *М2*;

*UM* – амплитуда (половина размаха) модулирующего процесса.

Как видно из (4.11) и (4.13), коэффициенты модуляции зависят линейно от амплитуды модулирующего колебания. Кроме того, коэффициент модуляции тока второй гармоники имеет нелинейные искажения, отражённые в *δ2*. Эти искажения присутствуют принципиально в любом случае, у нас они появились только для второй гармоники из-за того, что мы ограничились четвёртой степенью полинома при аппроксимации зависимости тока от напряжения в нелинейном элементе. При увеличении порядка аппроксимирующего полинома нелинейные искажения появятся и в коэффициенте модуляции для тока третей гармоники. Правда, необходимо отметить, что в нашей задаче уровни сигналов незначительны, поэтому аппроксимация степенным рядом четвёртого порядка соответствует хорошей степени приближения.

Для обеспечения оптимальной работы системы необходимо решить задачу оптимизации, которая заключается в максимизации коэффициентов модуляции при заданном уровне нелинейных искажений (в нашем случае уровень нелинейных искажений пропорционален амплитуде модулирующего колебания) и при условии согласования вибратора на частоте зондирующего колебания (см. главу 1.1). Ясно, что при прочих равных условиях, увеличение одного коэффициента модуляции приведёт к уменьшению второго, поэтому нужно выбрать оптимальное соотношение между коэффициентами модуляции второй и третей гармоники.

Для примерной количественной оценки коэффициентов модуляции рассчитаем их на примере конкретного диода. В качестве диода возьмём арсенид галевый высокочастотный диод, вольтамперная характеристика которого записана в виде:

*i=I0(eau-1)*, (4.14)

где *I0* ≈*4,5⋅10-8А, а=20В-1*.

Разлагая (4.14) в ряд Маклорена и ограничиваясь четвёртой степенью, можно получить:

, (4.15)



Сопоставляя выражения (4.15) и (4.5), и подставляя значения для *а*, получим *a1*=9⋅10-7(*А/В*), *a2*=9⋅10-6(*А/В2*), *a3*=6⋅10-5(*А/В3*), *a4*=3⋅10-4(*А/В4*).

Теперь необходимо подобрать смещение диода таким образом, чтобы дифференциальное сопротивление диода в рабочей точке было равно сопротивлению вибратора на частоте зондирующего сигнала. Из курса “Теория радиотехнических сигналов и цепей” известно, что дифференциальное сопротивление определяется значением производной функции напряжения от тока. В нашем случае известна обратная функция (зависимость тока от напряжения), поэтому мы можем найти дифференциальную проводимость. Возьмём производную от выражения (4.14) по напряжению, получим:

*YДИФ=a⋅I0⋅⋅eau*, (4.16)

Выразим из (4.16) *u* и вместо подставим *ЕСМ*, тогда получится следующее выражение для *ЕСМ*:

, (4.17а)



или

, (4.17б)



Подставляя значения для *а* и *RДИФ=75Ом* в (4.17б)*,* получим *ЕСМ*≈*0,48В*.

Далее, задаваясь допустимым уровнем нелинейных искажений, найдём значение для амплитуды *UM* из (4.12). Возьмём коэффициент модуляции 20%, а уровень нелинейных искажений *10%*, тогда получим значение для амплитуды модулирующего напряжения равного:

, (4.18)



Затем, используя выражение (4.11), выражаем и находим *Е0*, которое задаёт требования к передающему устройству (его место положение, расстояние, мощность и т.п.). Эти требования выбираются согласно (4.4). В нашем случае *Е0≈1,34(В).*

Исходя из анализа, проведённого в этом разделе, можно сделать следующие выводы:

* использовать полупроводниковый диод в качестве нелинейного элемента в отражателе – модуляторе с энергетической точки зрения выгодно, что связано с незначительными энергетическими затратами на источник смещения (*РСМ*≈*0,3мВт*) и на источник модулирующего напряжения (*РМОД*≈*0,2мВт*);
* увеличение коэффициента модуляции за счёт уменьшения уровня зондируемого сигнала, повлечёт за собой уменьшение уровня отражённого сигнала, что в некоторых случаях недопустимо;
* увеличение коэффициента модуляции за счёт увеличения амплитуды модулирующего напряжения приведёт к прямо пропорциональному увеличению уровня нелинейных искажений;
* произведение требуемой мощности и коэффициента направленного действия зондирующей антенны должно быть порядка десятков тысяч для расстояния порядка сотни метров;

В разделе приведена примерная методика расчёта отражателя-модулятора, некоторые её этапы могут быть выполнены другими методами и в другом порядке.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НА ПЭВМ

Для моделирования отражателя – модулятора используется компьютер IBM PC класса Pentium-166 64Мб ОЗУ. В качестве языка программирования выбран язык С++, реализованный в программном продукте фирмы «Microsoft» Visual C++ 5.0. Данное программное обеспечение позволяет создавать качественные мультимедийные и быстрые математические приложения. При моделировании широко использовались знания, полученные в курсе «Цифровое моделирование радиоэлектронных систем», всё моделирование построено на навыках, полученных в этом курсе.

## Исходные данные для программы

Исходные данные для программы разбиты на три основные группы:

* Параметры вибратора. В этой группе вводятся активные и реактивные составляющие сопротивления вибратора на трёх кратных частотах (всего должно быть введено шесть), а также значение частоты зондирования (частота, на которой вибратор является полуволновым).
* Параметры сигналов (зондирующего и модулирующего), напряжение смещения. Вводится либо выражение для сигнала (модулирующего и зондирующего), либо параметры гармонического колебания (амплитуда, частота фаза), кроме того, вводится число отсчётов на периоде высокочастотного сигнала, и число периодов модулирующего напряжения для расчёта (общее число точек расчёта равно произведению последнего параметра на отношение частот высокочастотного и модулирующего колебаний);
* Параметры модулирующей части. В этой группе вводятся параметры диода, варикапа, а также согласующих элементов. Кроме того, в этой же группе выбирается метод расчёта.

Для диода вводятся тепловой ток, коэффициент, обратно пропорциональный контактной разности потенциалов, и сопротивление базы (используется для варикапа в первой его реализации).

Для варикапа задаётся контактная разность потенциалов, ёмкость при напряжении смещения на варикапе, заданной в предыдущей группе, и коэффициент степени.

Здесь же задаются параметры согласующих элементов, которые по умолчанию, удовлетворяют условию согласования вибратора на первой гармонике;

В этих группах задаются все необходимые для работы программы параметры.

Окно с закладками для всех этих параметров открывается сразу же после запуска программы.

## Схема эксперимента

После нажатия клавиши «ОК» на окне параметров отражателя-модулятора, выводится окна с номиналами элементов для эквивалентной цепи. Далее, выводятся два графика в одном окне, которые показывают зависимости активной и реактивной составляющей сопротивления от частоты.

По этим графикам можно судить, насколько точно подобраны параметры модели, если параметры не устраивают, то нужно нажать на кнопку «Fn» и заново вести нужный параметр.

После того, как убеждаемся в правильности модели вибратора, переходим к расчёту коэффициентов модуляции. Для этого необходимо нажать на кнопку с восклицательным знаком. По окончании расчёта на экране выводится окно с параметрами полученной модуляции на всех трёх гармониках. Помимо этого, выводятся ещё два окна. На первом выводятся первые пять периодов высокочастотного колебания и полученная кривая для тока в вибраторе. На втором выводится модулирующее напряжение и соответствующие значения тока с тем же периодом. По этим графикам мы можем судить об общей картине тока в вибраторе.

Для сравнения полученных результатов с другими, рассчитанными для других элементов или параметров, нужно открыть новый документ и повторить все выше перечисленные действия.

## Блок-схема программы

Разработанная в ходе дипломной работы программа по своей блок – схеме практически не отличается от подобных программ моделирования. Поэтому в пояснительной записке отводится мало место под эту тему. Ниже приведём краткий список основных шагов блок – схемы программы. Основой работы являлась разработка общей модели симметричного вибратора, а перевод уже этой модели на язык программирования С++ формализован и реализован уже не в первой дипломной работе.

Итак, блок – схема программы имеет следующие основные шаги:

1. Ввод данных для симметричного вибратора, для сигналов и для моделей нелинейных элементов;
2. Расчёт параметров непрерывной модели симметричного вибратора;
3. Вывод графиков активной и реактивной составляющих полного сопротивления вибратора;
4. Синтез одной из реализаций симметричного вибратора по рассчитанным коэффициентам модели;
5. Вывод номиналов синтезированной цепи;
6. Расчёт коэффициентов дискретной модели вибратора и согласующих элементов;
7. Основной цикл программы;
8. Вывод параметров модуляции;
9. Вывод результирующих графиков.

Нужно отметить, что в конце программы можно вернуться к заданию новых параметров модели. Кроме того, можно создать новые документы, в которых будет проведён расчёт для других параметров модели.

## Результаты работы программы

В ПРИЛОЖЕНИИ 4 приведены графики для различных параметров модели отражателя – модулятора. По эти графикам видно, что для рассчитанного в главе 4 случая расход результатов составляет около 20-30%, что, вообще говоря, является хорошим результатом, поскольку вывод выражений в главе 4 ввёлся с допущениями на вольтамперную характеристику диода, которая справедлива в небольшом диапазоне напряжений. Кроме того, при увеличении шагов расчёта на одном периоде высокочастотного сигнала до 100, разница между результатами сокращается до 15%.

Следовательно, результаты, полученные в ходе теоретических и практических изысканий, соответствуют действительности с большой степенью вероятности, поскольку были получены разными путями.

Разработанная программа может служить и в дальнейшем для дополнительного моделирования отражателя – модулятора и подбора оптимальных параметров для его работы.

# РАСЧЁТ МОЩНОСТИ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ ПРИЁМНОЙ АНТЕННЫ

В настоящем разделе приведен вывод выражения для мощности сигнала на выходе приёмной антенны при зондировании отражателя – модулятора передатчиком. Расстояние между антенной передатчика и модулятора полагается равным *R1*, между модулятором и антенной приёмника – *R2.* В качестве сигнала рассматривается колебание, создаваемое в точке приёма за счёт переизлучения части энергии, наводимой в полуволновом вибраторе первичным полем. Кроме указанной составляющей в точке приёма существует ещё колебание, создаваемое непосредственным прохождением излучённой волны в точку приёма.

Однако в отличие от первой, эта составляющая не может быть модулирована сигналом, поступающим на отражатель – модулятор. Поскольку помехоустойчивость обработки по отношению к аддитивным помехам определяется суммарной мощностью боковых колебаний *РБОК=μ2⋅РС* (где *μ* - полный индекс амплитудно-фазовой модуляции, *РС* – мощность несущего колебания), то, найдя индекс модуляции *μ* и мощность сигнала *РС*, поступающего от диполя при отсутствии модуляции, параметр *РБОК* определяется полностью, и мощность сигнала прямого прохождения сигнала не имеет значения.

Как показано выше (4.4), амплитуда ЭДС, наведённой полем зондирующего сигнала, равна:

(4.4)



Амплитуда тока первой гармоники, вызванной действием ЭДС *Е0*, определяется равенством:

, (6.1)



где *ZД1* – сопротивление диода по первой гармонике тока вибратора;

*RΣ1* - сопротивление излучения вибратора на первой гармонике.

Мощность сигнала переизлучаемая вибратором на *k* – ой гармонике определяется выражением:

, (6.2)



Подставляя в (6.2) выражение (4.4) для амплитуды ЭДС *Е0* , можно получить:

, (6.3)



где

*PИЗк* – мощность, излучённая отражателем модулятором на *k* - ой гармонике;

*PT,GT(θ)* – мощность передатчика и коэффициент направленного действия его антенны;

*W=120π* - волновое сопротивление свободного пространства;

- отношение потоков мощности поступающего на экран сигнала и сигнала, прошедшего через экран – коэффициент экранировки.



Мощность сигнала на выходе приёмной антенны при условии идеального её согласования с приёмником на *k* – ой гармоники равна:

, (6.4)



где *GПР(θ)* – коэффициент направленного действия антенны для *k* – гармоники;

*k* – номер гармоники.

Подставляя в (6.4) соотношение (6.3), можно получить окончательное выражение для мощности сигнала на входе приёмника:

, (6.5)



Полученное соотношение позволяет оценить мощность сигнала на входе приёмника в зависимости от расстояния меду антенной передатчика и отражателем- модулятором, от расстояния между отражателем – модулятором и антенной приёмника, с учётом диаграмм направленности передающей и приёмной антенны, для различных гармоник зондирующего сигнала. С использованием соотношений раздела 4 можно получить мощность для полезного сигнала на входе приёмника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной дипломной работе был разработан приближённый метод для моделирования отражателя – модулятора, который может быть использован для получения количественных и качественных характеристик модуляции, полученной в данном устройстве. Метод позволяет найти коэффициенты модуляции на трёх гармониках зондирующего сигнала, коэффициенты относительной нелинейной модуляции и токи в симметричном вибраторе отражателя-модулятора также на всех трёх гармониках.
2. В дипломной работе разработана методика моделирования симметричного вибратора эквивалентной схемной функцией электрической цепи. Были выведены формулы для получения коэффициентов схемной функции, которые приведены в ПРИЛОЖЕНИИ 1. Эти формулы были проверены и показали свою полную состоятельность. Подобный метод моделирования симметричного вибратора не встречался ещё ни в одной литературе, которая была бы посвящена вопросам моделирования. С использованием этой модели открываются большие возможности моделирования антенн при помощи специализированных пакетов расчёта электрических цепей. Кроме того, эта модель помогла понять суть процессов, протекающих в вибраторе, которые до этого во времени излагались не совсем корректно.
3. В этой работе была совершена попытка некого эвристического синтеза электрических схем по заданной схемной функции. Пока ещё трудно сказать, действительно ли этот способ синтеза справедлив во всех случаях для положительной вещественной функции двухполюсника, однако ясно пока одно, что с его помощью можно получить простые и изящные реализации RLC-двухполюсников, чем, например, используя метод Бруне, который требует значительных вычислительных затрат.
4. Проведён упрощённый теоретический анализ модулятора на диоде, с использованием аппроксимации его вольтамперной характеристики полиномом четвёртой степени. В ходе этого анализа была обнаружена ошибка в выводах дипломной работы предыдущего года, посвящённой этой же теме. Согласно выводам, полученным в данной дипломной работе, использование отражателя-модулятора на диоде ничуть не дороже, с энергетической точки зрения источника напряжения смещения, чем использование в отражателе-модуляторе варикапа. Были получены формулы для вывода требуемых напряжений источников сигнала, исходя из заданных коэффициентов модуляции, которые говорят, что можно получить сравнительно большие коэффициенты модуляции (10%) при сравнительно не больших нелинейных искажениях (10%). Более того, эти формулы были подтверждены моделированием отражателя-модулятора на ПЭВМ, потому что максимальная разница в расчётах составила порядка 25%, что является хорошим приближением.
5. Был уточнён расчёт энергетических характеристик системы перехвата в целом. С учётом расстояний до зондирующего передатчика и приёмника, возможным экранированием пространства, различными диаграммами направленности симметричного вибратора на разных гармониках зондирующего сигнала.
6. Была разработана мощная программа для моделирования трёх реализаций отражателя-модулятора (одна для диода, две для варикапа). Программа позволяет моделировать симметричный вибратор по заданным его характеристикам на трёх кратных частотах, синтезирует его эквивалентную электрическую схему, позволяет менять различные параметры остальных элементов устройства, позволяет задавать все сигналы в аналитическом в виде, что делает её не заменимым инструментом при исследовании отражателя-модулятора. Программа показала результаты, которые полностью отвечают теоретическим исследованиям, и явилась их наглядным пособием.
7. В работе были описаны меры для предотвращения неблагоприятного воздействия на человека вредных факторов, связанных с работой на персональных электронно-вычислительных машинах, определены санитарно-гигиенические требования, предъявляемые к условиям работы на компьютере.
8. Моделирование устройства на ПЭВМ позволило сэкономить значительные денежные средства и сделало работу по исследованию более гибкой и не долгой по времени, что явилось причиной её сравнительно дешевизны.

Дальнейшее использование выводов и моделей, разработанных в этой работе позволить получить более качественные отражатели-модуляторы с оптимальными характеристиками, кроме того, появиться возможность реального моделирования на ПЭВМ процессов обработки сигналов, полученных в модели отражателя-модулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харкевич А.А. Основы радиотехники М.: «Связьиздат», 1962г. – 560с.
2. Моделирование в радиолокации/ А.И. Леонов, В.Н. Васенёв, Ю.И. Гайдуков и т.д.; Под ред. А.И. Леонова. – М.:Сов. Радио, 1979г., 264с.
3. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи М.: 1996г. 239с.
4. Попереченко Б.А. Антенно-фидерные устройства: Часть I. Теория излучения и приёма радиоволн. М.: 1961г. МЭИ. 135с.
5. Астрецов Д.В., Болотов Ю.Н. Методы анализа нелинейных и цифровых следящих систем. Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 1993г.
6. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов/ Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь. 1990г. 256с.
7. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Радио и связь, 1986г. 512с.
8. Радиоэлектронные системы: Методические указания к дипломному проектированию/ Астрецов Д.В., Лысенко Т.М. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995г. 36с.
9. Моделирование линейного инерционного звена второго порядка. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Цифровое моделирование радиоэлектронных систем»./ Дмитриев С.Н. Свердловск: УПИ, 1990г. 19с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1.** Основные расчётные формулы для вычисления коэффициентов.



ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

**Результирующие графики, полученные в ходе цифрового моделирования**

**Блок-схема моделирующей программы**



Ниже на графиках будут приведены данные цифрового моделирования.

Все данные разбиты на три большие группы. Эти группы определяются схемой отражателя-модулятора: первой группе соответствует схема, изображённая на рис.3.1; второй схема – рис.3.2; третьей – рис.3.3. Каждая из этих групп разбита ещё на три подгруппы, которые отвечают за отдельный эксперимент: первый эксперимент – снятие зависимостей параметров модуляции от частоты зондирующего сигнала (частота изменялась в пределах ±5%); второй эксперимент – снятие зависимостей параметров модуляции от амплитуды модулирующего напряжения (напряжение изменялось от 0 до 1В); третий эксперимент заключался в снятии зависимостей параметров модуляции от амплитуды напряжения высокочастотного сигнала (амплитуда изменялась от 0,5 – 1,5В). Под параметрами модуляции здесь понимаются такие величины как: полный индекс модуляции, фазовый угол модуляции, и относительные нелинейные коэффициенты модуляции. Все эти параметры находились путём нахождения необходимых спектральных составляющих тока вибратора, и дальнейшим их преобразованием.

Каждая подгруппа имеет по три графика, на каждом из которых изображены три кривые, соответствующие одному параметру для трёх кратных частот: частота зондирующего сигнала, удвоенная частота и утроенная частота. Эти параметры имеют соответствующие индексы, отвечающие номеру гармоники в порядке возрастания. Первый график во всех подгруппах отвечает за полные коэффициенты модуляции, второй график отвечает за относительные нелинейные коэффициенты модуляции, а третий за фазовый угол модуляции.



перечень документов дипломной работы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  п.п. | Наименование документа | Шифр | Кол-во |
| 1 | Пояснительная записка | 201600.000 000.003 ПЗ | 1 экз |
| 2 | Блок-схема моделирующей программы | 201600.000 000.003 Э1 | 1  лист |
| 3 | Схемы трёх типов отражателей-модуляторов.  Эквивалентная схема симметричного вибратора | 201600.000 000.003 Э2 | 1  лист |
| 4 | Графики активной и реактивной состаляющей полного сопротивления вибратора | 201600.000 000.003 Д1 | 1  лист |
| 5 | Эпюры напряжений и токов, полученных в результате моделирования | 201600.000 000.003 Д | 2  лист |
| 6 | Дискеты с программами | 201600.000 000.003 ПД | 5  шт |