

ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра систем информационной безопасности

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы  
«Моделирование варакторных умножителей частоты»  
по дисциплине «Устройства генерирования и формирования  
сигналов» для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника»  
(программа магистерской подготовки «Радиотехнические  
средства обработки и защиты информации в каналах связи»),  
специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы  
и комплексы»; по дисциплине «Устройства передачи и приёма  
сигналов в СПЦС» для студентов специальности 10.05.02  
«Информационная безопасность телекоммуникационных  
систем» очной формы обучения

Воронеж 2016

Составитель канд. техн. наук М.И. Бочаров

УДК 621.396.61

Методические указания к выполнению лабораторной работы «Моделирование варакторных умножителей частоты» по дисциплине «Устройства генерирования и формирования сигналов» для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника» (программа магистерской подготовки «Радиотехнические средства обработки информации в каналах связи»), специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»; по дисциплине «Устройства передачи и приёма сигналов в СПЦС» для студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. М.И. Бочаров. Воронеж. 2016. 36 с.

Методические указания содержат краткие сведения по основам построения умножителей частоты, описание модели лабораторной установки и руководство пользователя системой Micro-Cap 10, домашнее задание, а также вопросы для допуска к работе и её защиты.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «ВУЧ.pdf».

Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.В. Останков

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А.Г. Остапенко

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2016

# 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАБОТЕ

При выполнении работы необходимо:

Соблюдать требования техники безопасности в лаборатории.

Сообщать о возникающих неисправностях в работе аппаратуры руководителю занятий. Устранять неисправности и производить различные переключения, не предусмотренные содержанием работы, студенту запрещается.

Цель работы: изучить принцип действия варакторного умножителя частоты (ВУЧ); приобрести навыки расчета и моделирования исследования основных характеристик ВУЧ.

При выполнении лабораторной работы используются следующие виды приборов и оборудования: персональный компьютер, пакет прикладных программ Micro-Cap 10.

## 2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с назначением умножителей частоты (УЧ), принципом работы варакторных умножителей частоты (ВУЧ) последовательного и параллельного типов и их особенностями по сравнению с транзисторными УЧ.

2.2. Изучить зависимость энергетических показателей ВУЧ от кратности умножения, величины коэффициента нелинейности, варактора, потерь в контурах, варакторе и при изменении амплитуд сигналов, воздействующих на него.

2.3. Выполнить электрический расчет ВУЧ: определить параметры сигналов схемы ВУЧ и номиналы элементов этой схемы. Исходные данные для расчета приведены в таблице.

2.4. Изучить принципы построения широкополосных УЧ.

2.5. Ознакомиться с принципом построения схем в пакете прикладных программ Micro-Cap 10; изучить основные органы управления и методику исследования основных временных и частотных характеристик радиоэлектронных устройств.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип варактора	SMV-1142	SMV-1142	1N5443A	1N5443A	BDY51-02W	BDY51-02W	1N5145A	1N5145A
Кэфф. нелин. $\gamma$	0.5	0.5	0.33	0.5	0.33	0.33	0.5	0.5
Напр. смещ. $E, B$	-5	-6	-6	-4	-4	-5	-6	-5
Част. вход. сгн. $f_{ax}, \text{ МГц}$	500	1000	600	1200	700	900	800	1100
Кратность умнож. $N$	2	3	2	3	2	3	2	3

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ**

3.1. При выполнении задания по п.2.1 необходимо проработать источники [1...3], а также материалы, изложенные в приложении 1. В рабочей тетради следует отметить особенности различных типов УЧ, а также нарисовать типовые схемы ВУЧ (рис. П1.2, рис. П1.2).

3.2. При выполнении задания по п.2.2 следует обратиться к источнику [4], а также к приложению 1. В рабочую тетрадь занести значения нормированной выходной мощности и КПД, соответствующие оптимальному режиму и нормированных амплитуд сигналов, воздействующих на варактор для случая, когда потери в схеме отсутствуют (Приложение 1, выражения П1.8- П1.14).

3.3. При выполнении п.2.3 необходимо воспользоваться выражениями П1.15- П1.21 приложения 1, справочными параметрами варакторов [4] и определить параметры сигналов, действующих во входной и выходной цепях схемы, уровни входной и выходной мощностей ВУЧ и его КПД, а также номиналы элементов исследуемой схемы.

3.4. При выполнении п.2.4 необходимо ознакомиться с принципами построения как варакторных, так и транзисторных широкополосных УЧ [5...7] и уяснить особенности режима их работы и схемной реализации.

3.5. При выполнении п.2.5 необходимо воспользоваться описанием программы Micro-Cap (приложение 3).

## 4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1. Ознакомиться со схемой ВУЧ смоделированной с помощью Micro-Cap 10, назначением органов управления модели и установить расчетные параметры элементов схемы, с помощью частотного анализа проверить настройку контуров ВУЧ.

4.2. Исследовать работу ВУЧ в барьерном режиме при удвоении частоты с максимальной мощностью в нагрузке.

Установить амплитуду входного тока и другие параметры сигналов в соответствии с расчетными значениями для  $N=2$  по данным одного из вариантов домашнего задания (см. табл. 2.1). Входной контур настроить в резонанс на частоту возбуждения, а выходной – на вторую гармонику частоты возбуждения. Определить амплитуду тока, протекающего во входном контуре, с помощью выражения

$$I_{ex} = (U_r - U_1) / R2, \quad (4.1)$$

где  $U_r$  - амплитуда напряжения на выходе генератора (измеряется в узле XS1);

$U_1$  - амплитуда напряжения на входном контуре (измеряется в узле XS2 ).

Определить мощность в нагрузке по формуле

$$P_H = U_H^2 / 2R4, \quad (4.2)$$

где  $U_H$  - амплитуда второй гармоники напряжения на нагрузке (измеряется в узле XS4).

По данным эксперимента определить также входную мощность ВУЧ

$$P_{\text{ex}} = \frac{1}{2} I_{\text{ex}} U_1 \text{ и КПД } \eta = \frac{P_H}{P_{\text{ex}}}. \quad (4.3)$$

Занести в отчет данные расчета и эксперимента.

4.3. Снять нагрузочные характеристики ВУЧ при удвоении частоты.

Осуществляя ступенчатое изменение сопротивления нагрузки тумблером  $R_4$  и, поддерживая амплитуду напряжения на выходе возбудителя постоянной ( $U_r = \text{const}$  и равной значению для п.4.2); определить необходимые первичные энергетические параметры для расчета энергетических показателей ВУЧ. Результаты занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Нагрузочные характеристики ВУЧ

Данные моделирования				Результаты расчета			
$R_4$ , Ом	$U_r$ , В	$U_1$ , В	$U_H$ , В	$I_{\text{ex}}$ , мА	$P_{\text{ex}}$ , мВт	$P_H$ , мВт	$\eta$ , %

По данным табл. 4.1 построить нагрузочные характеристики. Определить сопротивления нагрузки, соответствующие  $P_{H\text{max}}$  и  $\eta_{\text{max}}$ . Зарисовать осциллограммы выходного колебания при  $R_H = R_{\text{ном}}$  и  $R_H = R_{H\text{min}}$ .

4.4. Снять амплитудные характеристики ВУЧ для  $N = 2$ .

Установить оптимальное сопротивление нагрузки  $R_4$ , а значение амплитуды входного напряжения  $U_r = 1$  В. Настроить входной и выходной контуры ВУЧ в резонанс. В табл. 4.2 занести значения  $U_r$ ,  $U_1$ ,  $U_H$ .

Произвести расчет энергетических показателей ВУЧ, результаты которых также записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Амплитудные характеристики ВУЧ

Данные моделирования			Результаты расчета			
$U_G, В$	$U_1, В$	$U_H, В$	$I_{ex}, МА$	$P_{ex}, мВт$	$P_H, мВт$	$\eta, \%$

Повторить указанную выше процедуру 3...4 раза для других значений амплитуды  $U_G$ .

Внимание! При выполнении работы по П.4.4 обратить внимание на то, чтобы ВУЧ работал в барьерном режиме, что соответствует режиму, при котором ток через индикатор “МА” не протекает.

По данным табл. 4.2 построить амплитудные характеристики

$$P_H = f(P_{ex}) \text{ и } \eta = \varphi(P_{ex}). \quad (4.4)$$

4.5. Определить оптимальные энергетические показатели ВУЧ в барьерном режиме для  $N=3$ .

Установить амплитуду входного тока и другие параметры сигналов в соответствии с вариантом домашнего задания ( $N=3$ ). Выходной контур настроить на третью гармонику. По данным эксперимента определить мощность в нагрузке и КПД ВУЧ при утроении частоты.

4.6. Исследовать ВУЧ в режиме открывания p-n перехода ( $N=2$ ).

Установить параметры сигнала аналогично п4.2, а регулятором р-п установить напряжение смещения  $E$  таким, чтобы амплитуда напряжения первой гармоники на варакторе превышала напряжение смещения на 1...2 В. Определить энергетические показатели ВУЧ при открывании р-п перехода.

Зарисовать осциллограммы выходных колебаний ВУЧ.

4.7. Исследовать спектр напряжения, создаваемого на нагрузке в режиме с оптимальной мощностью в нагрузке.

Воспользовавшись методикой определения спектра выходного сигнала на нагрузке ВУЧ (приложение 3), произвести расчет относительного уровня побочных гармоник на выходе ВУЧ для исследуемых кратностей умножения.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

5.1. Цель работы

5.2. Результаты расчетов, полученные в соответствии с пунктами 3.2 и 3.3

5.3. Результаты моделирования, полученные в соответствии с выполнением П4.2 ... 4.7 лабораторного задания и содержащими как количественную, так и качественную оценку полученных результатов, а также сравнение их с данными расчетов.

5.3. Вывод по работе по каждому из выполненных пунктов лабораторного задания.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Поясните принцип работы УЧ различного типа.

6.2. Назовите область применения УЧ.

6.3. Каковы преимущества ВУЧ по сравнению транзисторными УЧ?

6.4. Приведите последовательную и параллельную схемы ВУЧ. В чем состоит принципиальное отличие этих схем?

6.5. Какие преимущества имеет ВУЧ при открывании р-п перехода по сравнению с барьерным режимом?

6.6. Как влияет коэффициент нелинейности  $\gamma$  кулонвольтовой характеристики (КВХ) варактора на энергетические характеристики ВУЧ?

6.7. Почему в режиме открывания р-п перехода выходная мощность ВУЧ возрастает?

6.8. Как изменяется КПД ВУЧ при переходе из барьерного режима в режим открывания р-п перехода?

6.9. Как изменяется выходная мощность ВУЧ и КПД с ростом кратности умножения?

6.10. Почему с ростом входной мощности в барьерном режиме увеличивается выходная мощность и КПД?

6.11. Как изменение сопротивления нагрузки сказывается на форме выходного напряжения УЧ?

6.12. Чем обусловлен высокий КПД ВУЧ ?

6.13. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе варактора?

6.14. Каково соотношение должно быть выполнено при выборе емкостей входного и выходного фильтров ВУЧ?

6.15. Какое внутреннее сопротивление должен иметь источник сигналов в параллельной схеме ВУЧ? В последовательной схеме ВУЧ?

6.16. Какие преимущества имеет параллельная схема ВУЧ перед последовательной схемой?

6.17. Поясните физическую сущность образования барьерной емкости р-п перехода.

6.18. Поясните физическую сущность явления накопления заряда.

6.18. Каковы теоретические основы построения широкополосного УЧ?

6.19. Как реализовать широкополосный УЧ с кратностью умножения  $N=2$ ?

6.20. Какие преимущества широкополосных умножителей частоты перед узкополосными?

6.21. Как обеспечить высокую технологичность реализации широкополосных УЧ?

6.22. Какие преимущества широкополосных УЧ на полевых транзисторах по сравнению с широкополосными ВУЧ?

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### КРАТКИЕ ТЕОРИТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Применение умножителей частоты в устройствах генерирования и формирования сигналов позволяет:

применить кварцевую стабилизацию частоты в диапазоне частот, превышающих полосу рабочих частот кварцевых резонаторов;

понизить частоту задающего генератора и тем самым обеспечить задачу стабилизации частоты;

ослабить паразитные связи и увеличить устойчивость работы передатчика с большим коэффициентом усиления и особенно в диапазоне СВЧ;

увеличить абсолютную девиацию частоты или фазы при угловой модуляции.

УЧ называется устройство, в котором при подаче на вход гармонического колебания

$$u_{\text{ex}} = U_{\text{ex}} \cdot \cos(\omega_{\text{ex}} t + \varphi_1), \quad (\text{П1.1})$$

где  $U_{\text{ex}}$ ,  $\omega_{\text{ex}}$ ,  $\varphi_1$  - амплитуда, частота и начальная фаза соответственно, на его выходе образуется колебание

$$u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cdot \cos(N\omega_{\text{ex}} t + N\varphi_1), \quad (\text{П1.2})$$

где  $U_{\text{вых}}$  - амплитуда выходного колебания;

$N = 2, 3, 4, \dots$  - целые числа.

Умножитель частоты является кратным преобразователем частоты.

При умножении частоты происходит также умножение и начальной фазы, которая для выходного сигнала (П1.2)

составляет  $\varphi_N = N\varphi_1$ , т.е. увеличивается в N раз. Поэтому в общем случае УЧ является преобразователем фазы.

По принципу действия УЧ можно разделить на три группы: искажающего типа; путем синхронизации частоты автогенератора внешним сигналом с частотой, близкой к субгармонике; с использованием системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

В УЧ первого типа для искажения формы сигнала используются нелинейные элементы (НЭ), в качестве которых используются транзисторы, диоды, варакторы и другие НЭ.

УЧ второго типа представляют собой гармонические автогенераторы (чаще всего LC типа), синхронизируемые на субгармонике входного синусоидального сигнала.

УЧ третьего типа строятся также на основе автогенератора (АГ), включенного в кольцо ФАПЧ. В это кольцо также включен делитель частоты в N раз, выходное напряжение которого подается на фазовый детектор. На второй вход ФД подается сигнал от источника колебаний, частота которого подлежит умножению. В результате сравнения этих колебаний на выходе ФД вырабатывается сигнал ошибки, подстраивающий частоту (фазу) колебаний так, что на выходе АГ устанавливается частота  $N\omega_{\text{вх}}$ .

Основными параметрами УЧ искажающего типа является коэффициент (кратность умножения)N;

рабочая частота  $\omega_{\text{вх}}$ ;

выходная мощность N- ой гармоники  $P_N$ ;

входная мощность  $P_1$ ;

коэффициент преобразования (усиления)  $K_N = P_N / P_1$ ;

коэффициент полезного действия  $\eta = P_N / P_0$  ( $P_0$ - потребляемая мощность);

уровень подавления побочных гармоник

$$a_N = 20 \lg U_K / U_N,$$

где  $K=1; N-1; N+1$  и т.д.;

$U_K$  - амплитуда  $K$ -й гармоники.

## В а р а к т о р н ы е   у м н о ж и т е л и   ч а с т о т ы

В варакторных умножителях частоты для умножения частоты используется специальный класс НЭ варактор – это диод с  $p-n$  переходом, работающим в режиме с частичным открыванием. В этом случае используется нелинейность суммарной (барьерной и диффузионной) емкостей  $p-n$  перехода.

В идеальном случае варактор можно считать емкостью, не имеющей потерь, поскольку протекающий ток не содержит постоянной составляющей. В этом случае преобразование мощности  $P_\omega$  на выход осуществляется без потерь в соответствии с соотношением Менли-Роу:

$$P_\omega = -P_{N\omega}, \quad (\text{П1.3})$$

где  $P_{N\omega}$  - мощность в нагрузке (на выходной частоте) [3].

Знак “минус” в выражении (П1.3) означает, что мощность в нагрузке потребляется.

Из (П1.3) следует, что КПД идеального варактора УЧ составляет 100 %, что является его преимуществом по сравнению с диодными и транзисторными УЧ.

Это преимущество можно использовать для получения больших уровней мощностей на очень высоких частотах (в области частот, где транзисторные УЧ либо работают неэффективно, либо вообще не работают).

Кроме этого за счет очень резкого изменения диффузионной емкости варактора от приложенного напряжения в ВУЧ достигается большая кратность умножения частоты на один каскад (до 5...10).

ВУЧ могут работать как в барьерном режиме, так и при открывании р-п перехода. Образование барьерной емкости обусловлено следующими факторами. При контакте полупроводниковых материалов п и р – типов подвижные электроны уходят в области п – типа, а подвижные дырки покидают р – область. В результате этого вблизи граничного слоя п типа становится положительно заряженной, а р типа – отрицательно заряженной. Наличие разноименных зарядов с обеих сторон контактной зоны при малой ее ширине позволяет считать р – п переход конденсатором. Обратное напряжение, приложенное к р – п переходу, влияет на распространение зарядов и, соответственно, изменяет величину емкости р – п перехода. Барьерная емкость запятого р – п перехода связана с приложенным напряжением соотношением

$$C_e(u) = \frac{dq}{du} = C_0 [(\varphi_k - E) / (\varphi_k - u)]^\gamma, \quad (\text{П1.4})$$

где  $C_0$  - емкость в рабочей точке;

$\varphi_k$  - контактная разность потенциалов ( $\varphi_k = 0,3 \dots 0,5$  В);

E- напряжение смещения (рабочая точка);

$\gamma$  - коэффициент нелинейности ( $\gamma = 1/2$  для сплавной и  $\gamma = 1/3$  для диффузной технологии;  $\gamma > 1$  - сверхрезкий р-п переход).

ВУЧ на барьерной емкости р-п перехода могут работать в широком диапазоне частот, вплоть до миллиметровых волн, имеют высокую стабильность параметров. Их недостаток – малые значения преобразуемой мощности.

Одним из более перспективных способов повышение мощности в сантиметровом и более высоком диапазоне волн

является использование эффекта накопления заряда в р – n переходе.

Механизм умножения частоты на диодах с накоплением заряда (ДНЗ) связан с особенностями переходного процесса накопления и рассасывания неосновных носителей, имеющими место при воздействии на диод переменного напряжения. При положительной полуволне напряжения р – n переход инжектирует в область базы дырки, которые диффундируют в направлении базового омического контакта. В процессе диффузии часть инжектированных дырок рекомбинируют с электронами базы, поэтому концентрация избыточных дырок уменьшается по мере удаления от контактной зоны перехода. Если время жизни дырок существенно превышает период сигнала, то дырки не успевают рекомбинировать и при изменении полярности сигнала начинается экстракция дырок из базы. Таким образом, в течении некоторого времени на диоде поддерживается состояние высокой обратной проводимости. Во внешней цепи этот процесс рассматривается как перезарядка диффузионной емкости.

Явление накопления заряда присуще обычным варакторам, работающим в режиме частичного открывания р – n перехода. Однако благодаря некоторым технологическим мерам этот эффект можно усилить.

Приведем некоторые количественные соотношения, характеризующие работу р – n перехода. Следует иметь в виду, что явление накопления заряда проявляется значительно, если ток, протекающий через диффузионную емкость, значительно превышает ток, протекающий через сопротивление рекомбинации. Это требование поясняется следующим соотношением:

$$\omega > 10 / \tau_p, \quad (\text{П1.5})$$

где  $\tau_p = C_o r_p$  - постоянная времени рекомбинации;

$C_{э}, r_p$  - диффузионная емкость и сопротивление рекомбинации соответственно.

С другой стороны, рабочая частота должна быть достаточно мала, чтобы были относительно малы потери на сопротивлении полупроводникового материала, а также потери, обусловленные конечным временем восстановления  $t_g$  закрытого состояния р – п перехода

$$\omega < 1/10C_{э}r_p, \quad \omega < 1/10t_g, \quad (\text{П1.6})$$

где  $r_s$  - сопротивление полупроводникового материала;

$t_g$  - время восстановления закрытого состояния р – п перехода.

Применение ДНЗ позволяет получить достаточно высокие энергетические показатели и для высокой кратности умножения ( $N=5...7$  на каскад).

Значительная диффузионная емкость открытого р – п перехода, сравнительно малые значения барьерной емкости и ее нелинейности позволяют аппроксимировать кулонвольтную характеристику кусочно-линейной зависимостью

$$u = \begin{cases} q/C, & q \geq 0 \\ 0, & q \leq 0 \end{cases}, \quad (\text{П1.7})$$

где  $C = Q_{\max} / U_{\max}$  - усредненная емкость запертого р – п перехода,

$Q_{\max}, U_{\max}$  - максимальные мгновенные значения заряда и напряжения на варакторе.

Наибольшее распространение получили двухконтурные ВУЧ последовательного (рис.П.1.1) и параллельного (рис.П.1.2) типов [3].

В ВУЧ последовательного типа

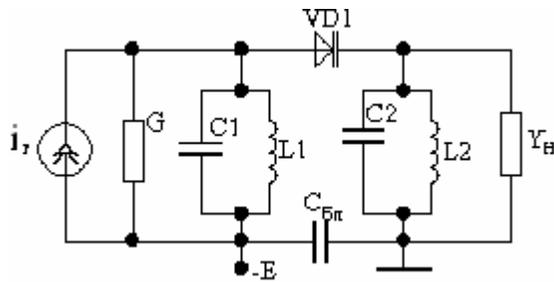


Рис. П1.1. Схема двухконтурного ВУЧ последовательного типа

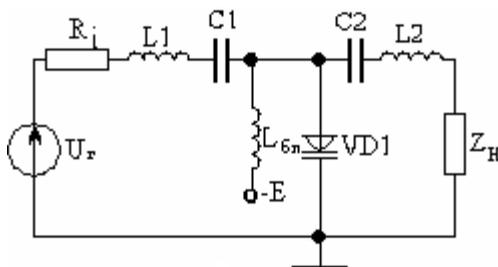


Рис. П1.2. Схема двухконтурного ВУЧ параллельного типа

источник сигнала частоты накачки (источник тока  $i_r$ ), варактор VD1 и нагрузка  $Y_H$  включены последовательно. Параллельные контуры L1C1, L2C2 настроены на частоты  $\omega_{вх}$  и  $N\omega_{вх}$  соответственно. В этой схеме при воздействии на варактор напряжения с частотой  $\omega_{вх}$  заряда на нем содержит спектр с частотами  $\omega_{вх}$  ( $n= 1, 2, 3, \dots$ ). Выходной контур из

всех этих частот выделяет составляющую  $N\omega_{ex}$ , поскольку он настроен на эту частоту. В нагрузке  $Y_H$  при этом выделяется мощность  $N$ -й гармоники.

В ВУЧ параллельного типа источник сигнала  $U_G$  (источник напряжения), варактор VD1 и нагрузка  $Z_H$  включены параллельно, а последовательные контуры L1C1, L2C2 настроены на частоты  $\omega_{ex}$  и  $N\omega_{ex}$  соответственно. В этой схеме, при воздействии на варактор заряда с частотой  $\omega_{ex}$ , напряжение на нем искажает свою форму и содержит составляющие с частотами  $n\omega_{ex}$  ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ). Так как выходной контур на резонансной частоте имеет минимальное сопротивление, то через него протекает ток частоты  $N\omega_{ex}$  и, соответственно, выделяется мощность  $N$ -й гармоники.

Входная и выходная мощности ВУЧ определяются равенствами

$$P_{\omega} = \frac{1}{2} I_1 U_{1кв}, \quad P_{N\omega} = \frac{1}{2} I_N U_{Nкв}, \quad (\text{П1.8})$$

где  $I_1 = \omega_{ex} Q_1$  - амплитуда тока первой гармоники, протекающего во входном контуре;

$Q_1$  - амплитуда заряда частоты  $\omega_{ex}$ ;

$I_N = N\omega_{ex} Q$  - амплитуда тока, протекающего в выходном контуре;

$Q_N$  - амплитуда заряда частоты  $N\omega_{ex}$ ;

$U_{1кв}$ ,  $U_{Nкв}$  - квадратурные Фурье- составляющие напряжения.

Преобразуемая мощность может быть вычислена по любому из выражений (П1.8), т. е. трансформируемая мощность  $P = / P_{\omega} / = / P_{N\omega} /$ .

С учетом сопротивлений потерь  $R_n$  ( $n=1; N$ ) выражения для мощности в нагрузке и коэффициента передачи мощности записываются в виде

$$P_H = P - 0,5 I_n^2 R_N, \quad (\text{П1.9})$$

$$\eta = \frac{P - 0,5 I_N^2 R_N}{P + 0,5 I_1^2 R_1}. \quad (\text{П1.10})$$

Выходную мощность ВУЧ определить достаточно сложно из-за трудоемкой вычислительной процедуры, обусловленной тем, что через варактор протекает сигнал в виде двух гармоник (для одной гармоники эта задача сводится к определению коэффициентов Берга). Для бигармонического сигнала выходная мощность определена в [3] и для барьерного режима представлена на рис. П1.4 графическими зависимостями  $P_H / P_0$  для различных значений  $N$ , коэффициент нелинейности  $\gamma$  варактора ( $P_0 = 0,5 \omega_{\text{ex}} C_0 U_0^2$  - нормировочный коэффициент;  $U_0 = \varphi_k - E$ ), нормированных потерь  $r_n$  ( $n=1, N$ ) при изменении амплитуд  $M_n$  ( $M_n = I_n / n \omega_{\text{ex}} C_0 U_0$ ) при полном использовании закрытого  $p - n$  перехода по напряжению:

1 -  $r_n = 0$ ; 2 -  $r_n = 0,02$ ; 3 -  $r_n = 0,05$ ; 4 -  $r_n = 0,1$ ; 5 -  $r_n = 0,03$

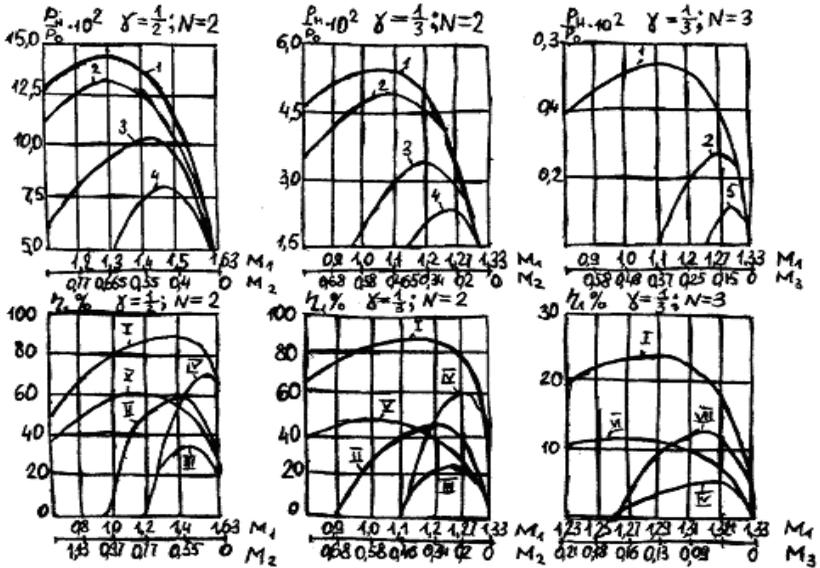


Рис. П1.4. Зависимости выходной мощности ВУЧ и КПД от потерь и амплитуд воздействующих сигналов

На этом рисунке приведены также зависимости  $\eta$  от изменения нормированных потерь. Нормировка сопротивлений полных потерь  $r_n$  на частотах  $\omega$  произведена по формуле

$$r_n = R_n \omega C, \tag{П1.11}$$

где  $R_n = R_{kn} + R_g$  - полные омические потери;

$R_{kn} = \rho_n / Q_n$  - омические потери в контурах;

$\rho_n, Q_n$  - волноводные сопротивления и добротности контуров соответственно;

$R_g = (\omega_{\text{ex}} C_0 Q_g)^{-1}$  - потери в варакторе (приняты равными на входной и выходной частотах);

$Q_g$  - добротность варактора.

Для открытого р – n перехода и  $N=2$  на рис. П1.5 приведены зависимости нормированной выходной мощности  $\beta = 4 P_H / P_0 [1 - (Q_{\text{min}} / Q_{\text{max}})]$ . При различной степени

открывания варактора  $M_0 = Q_0 / Q_n$  - параметр нормировки;

$Q_{\text{min}}$  - минимальное значение заряда на открытом р – n переходе.

На рис. П1.5 приведена также зависимость  $U_0 / U_{\text{max}}$ , соответствующая режимам работы варактора с  $M_0 / < 1$  и шагом 0,1.

При выполнении задания по п.2.3 в начале с использованием формулы (П1.14) определяются нормированные потери  $r_n$  (с использованием справочных данных варактора [4] и добротности контуров, значениями которых необходимо задаться ( $50 \leq Q_n \leq 300$ )), а затем по графикам рис. П1.4 (по  $r_n$ ) следует определить максимальное значение величины  $P_n / P_0 = \alpha$  и соответствующих этому значению величин  $M_{\text{ном}}$ . С учетом этого

$$P_H = 0,5 \omega_{\text{ex}} C_0 U_0^2 10^{-2} \alpha, \quad (\text{П1.12})$$

где  $U_0 = \varphi_k - E$ ;

$\omega_{\text{ex}} = 2\pi f_{\text{ex}}$  - частота входного сигнала.

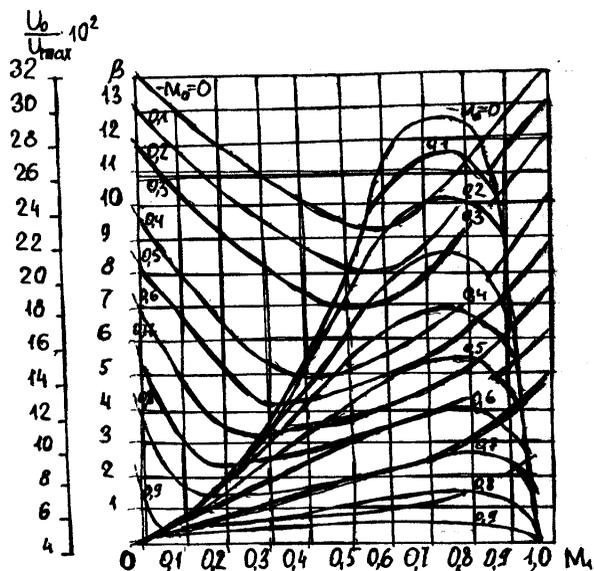


Рис. П1.5. Зависимости выходной мощности и постоянной составляющей напряжения от амплитуды входного заряда.

Амплитуды токов, протекающих через варактор, рассчитывается по формуле (рис. П1.4)

$$I_{nonm} = n\omega_{ex} C_0 U_0 M_{nonm} \cdot \quad (\text{П1.13})$$

Оптимальное сопротивление нагрузки находится из:

$$R_{Hopt} = 2P_H / I_N^2 \cdot \quad (\text{П1.14})$$

По графикам рис. П1.2 определяется также и КПД  $\eta$  (с использованием  $r_1, r_n$  и  $M_{nonm}$ ).

Параметры элементов схемы (рис. П1.2) выбираются из следующих условий. Емкости контуров должны удовлетворять условию их слабой статической связи через

варактор, поэтому их параметры следует выбирать из соотношения

$$Cn_{\Sigma} \leq A_c C_0, \quad (\text{П1.15})$$

где  $A_c \leq 0,25 \dots 0,1$  - коэффициент;

$Cn$  -емкости входного и выходного контуров (с учетом обозначений элементов на схеме рис. П1.2  $C1_{\Sigma} = C1 + C1^*, C2_{\Sigma} = C2 + C2^*$ ).

Неравенство (П1.15) по возможности следует усилить (на практике это не всегда удается из условий физической реализуемости).

Индуктивности контуров  $L1$  и  $L2$  (без учета реактивных составляющих внутреннего сопротивления источника сигналов и нагрузки) определяется из неравенств

$$\omega_{ex} L1 - \frac{1}{\omega_{ex}} \left( \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C1_{\Sigma}} \right) = 0, \quad (\text{П1.16})$$

$$N \omega_{ex} L2 - \frac{1}{N \omega_{ex}} \left( \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C2_{\Sigma}} \right) = 0. \quad (\text{П1.17})$$

Индуктивность дросселя  $L_{\bar{o}l}$  выбирается из условия

$$L_{\bar{o}l} \geq A_L L1, \quad (\text{П1.18})$$

где  $A_L = 10 \dots 20$  – коэффициент.

**Широкполосные УЧ в системах связи**

Широкполосные УЧ в телекоммуникационных системах находят применение, что обусловлено рядом их

особенностей: малым временем установления выходных колебаний; простотой получения высокостабильных колебаний в диапазоне высоких частот; простотой реализации и др. Эти УЧ обычно являются узкополосными и реализуются на основе искажения входного сигнала нелинейным элементом (НЭ) и последующим выделением N-ой гармоники с помощью фильтра.

Недостатками таких УЧ являются: узкополосность и низкая технологичность.

В последнее время появилась необходимость использования широкополосных УЧ в различных диапазонах волн, включая СВЧ.

Теоретически реализовать широкополосные УЧ можно с использованием нелинейных элементов с характеристиками в виде полиномов Чебышева  $T_N(x)$  N-ой степени.

Наиболее просто реализовать широкополосный УЧ с кратностью умножения  $N=2$  фазокомпенсационным методом с использованием как полевых транзисторов (ПТ), так и варакторов с квадратичными характеристиками.

Наиболее высокочастотным является устройство [6], выполненное на ПТ и содержащее фазоинверсный каскад и двухтактный каскад, выполненный по схеме с общим затвором (ОЗ) и работающий в режиме с углом отсечки  $90^0$ . Это обусловлено тем, что в устройстве [5] имеется 100 % внутренняя обратная связь по току, поэтому уровень нежелательных колебаний снижается. Кроме этого в устройстве [5] происходит и значительное расширение диапазона рабочих частот в сторону более высоких по сравнению с другими типами, выполненными на ПТ, в том числе с варакторными.

Результаты схемотехнического моделирования УЧ [6], выполненного на основе транзисторной сборки ПТ с управляющим p-n-переходом типа J2PS104G, показали его большую широкополосность, значительно превышающую

октаву и низкий уровень побочных гармоник (ниже  $-60$  дБ). Это устройство работает вплоть до частот, близких к верхней граничной частоте используемых транзисторов.

Результаты моделирования ВУЧ [7] проводились с использованием идеализированной модели (1) с  $\gamma=1/2$ . Установлено, что устройство также имеет большую широкополосность. Однако область верхних частот его граничная частота ограничивается частотами ОУ, в несколько раз ниже граничной частоты используемых транзисторов при высоком уровне побочных колебаний.

Применение широкополосных УЧ в телекоммуникационных системах позволяет использовать широкополосные и сверхширокополосные виды модуляции. В результате можно обеспечить помехозащищенность каналов передачи сигналов, обеспечить защиту информации и технологичность при их практической реализации. Исследуемые широкополосные УЧ имеют малое время установления колебаний, равное нескольким десяткам периодов выходного сигнала, что повышает и быстродействие систем связи.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Электрическая модель лабораторной установки, схема которой приведена на рис. П2.1, выполнена в виде устройства, состоящего из высокочастотного генератора синусоидальных колебаний  $V1$ , источника напряжения смещения  $E$ , входного ( $L1$ ,  $C1$ ,  $C1^*$ ) и выходного ( $L2$ ,  $C2$ ,  $C2^*$ ) фильтров, сопротивления нагрузки  $R3$  и измерительного резистора  $R2$ , а также варактора  $VD1$ , конденсаторы  $C1^*$ ,  $C2^*$  используются для более точной настройки входного и выходного фильтров на заданные частоты. Цепь подачи напряжения смещения включает источник смещения  $E_c$ , блокировочной индуктивности  $L_{\text{бл1}}$ .

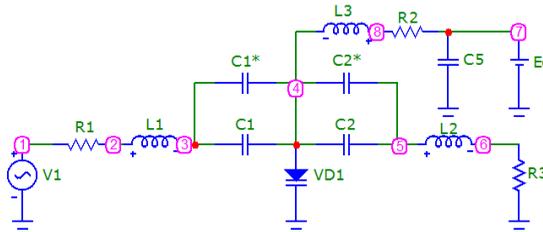


Рис. П2.1. Электрическая схема модели ВУЧ

Барьерный режим работы в устанавливается по значениям тока протекающего через  $R2$ , который должен составлять 1-3 мкА (т.е. соответствовать началу открывания варактора  $VD1$ ). Режим частичного открывания варактора соответствует протеканию через резистор  $R2$  тока несколько миллиампер и более.



На верхней панели можем увидеть наименование файла, который мы создаем либо редактируем в программе. Размер окна можно редактировать как удобно пользователю, так же с помощью стандартных для ОС Windows кнопок можно закрыть или свернуть программу. Ниже находятся различные падающие меню и стандартные панели инструментов, иконки инструментов часто иллюстрируют их назначение.

## 2. Описание программных средств ввода графической информации пакета прикладных программ МС10

При добавлении каждого компонента в схему на рабочем поле программы необходимо задать его атрибуты: позиционное обозначение (осуществляется автоматически, но можно впоследствии поменять), номинальное значение и (или) модель. Для задания этих параметров открывается специальное окно. Для всех компонентов Micro-Cap эти окна имеют примерно одинаковую структуру. Для большинства пассивных компонентов модель указывать не обязательно (хотя, возможно и такое). Если указана модель, то активными становятся поля с ее параметрами в нижней части окна.

Так же изменять номиналы (пассивных элементов) и наименование можно также задавать номиналы не заходя в дополнительное окно, а прямо в рабочем окне программы, для этого нужно навести на наименование и с помощью двойного щелчка начать редактирование (рис.П3.2).

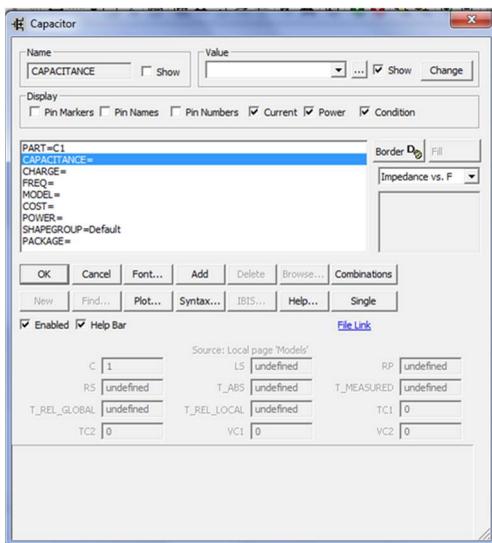


Рис. ПЗ.2. Окно задания параметров компонентов

### 3. Схмотехническое моделирование динамических характеристик радиоэлектронных средств в ППП МС10

Для анализа динамических характеристик радиоэлектронных средств в ППП МС10 используется режим анализа переходных процессов –Transient. Анализ переходных процессов позволяет рассмотреть поведение схем во временной области. Он позволяет ответить на вопрос, что произойдет, если к собранной схеме подключить источники питания и источники сигналов. Полученные диаграммы позволяют просматривать процессы в моделируемой схеме так же, как это в реальности делается при помощи осциллографа или логического анализатора. При проведении анализа предполагается, что схема в общем случае

нелинейна, хотя возможно рассчитывать и частный случай — поведение линейных схем во временной области.

При запуске анализа переходных процессов из режима построения схемы или после иных видов анализа командой Analysis→Transient программа проверяет правильность составления схемы. При наличии ошибок выводится информационное сообщение. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному расчету переходных процессов и открывает окно задания параметров моделирования Transient Analysis Limits (рис.П3.3) .

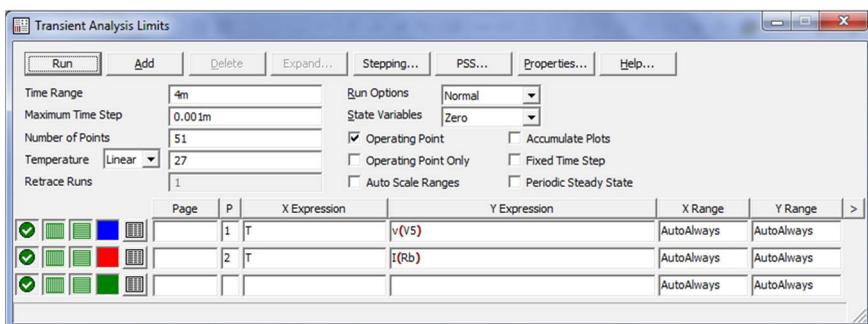


Рис. П3.3. Окно задания параметров моделирования Transient Analysis Limits

В этом окне содержатся кнопки запуска анализа (Run), добавления ещё одной строки спецификации вывода результатов (Add), удаления строки (Delete), открытия дополнительного окна для ввода строки большого размера (Expand), открытия диалогового окна задания вариации параметров (Stepping), открытия окна установки параметров

нахождения стационарного режима (PSS), открытия окна параметров (Properties), открытия окна помощи (Help).

Так же здесь присутствуют поля ввода для параметров моделирования: конечное начальное время расчёт переходных процессов (Time Range), максимальный шаг расчёта (Maximum TimeStep), число точек, выводимых в таблицы (Numberof Points), диапазон изменения температуры (Temperature), число запусков анализа (Retrace Runs).

Ниже отображены поля для ввода переменных и их параметров, аналогично DC Analysis Limits, за исключением переменной по оси абсцисс. В данном режиме данное значение зафиксировано исключительно для переменной времени T.

При правильно-введённых параметрах моделирования и при запуске процесса анализа открывается окно с результатами Transient Analysis ( рис.ПЗ.4).

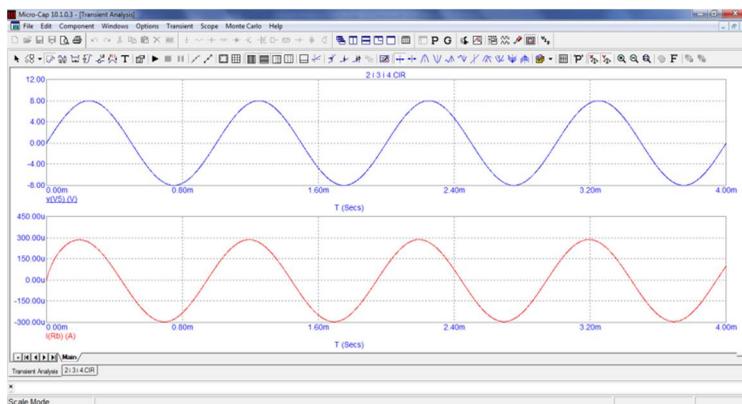


Рис. ПЗ.4. Окно результатов анализа Transient Analysis

#### 4. Схемотехническое моделирование частотных характеристик радиоэлектронных средств в МС10

Для анализа частотных характеристик радиоэлектронных средств в ППП МС10 используется режим анализа по переменному току на малом сигнале – АС. В режиме АС сначала рассчитывается режим схемы по постоянному току, затем линеаризуются все нелинейные компоненты (пассивные компоненты с нелинейными параметрами, диоды, транзисторы, нелинейные управляемые источники) и выполняется расчет комплексных амплитуд узловых потенциалов и токов ветвей. При линеаризации цифровые компоненты заменяются их входными и выходными комплексными сопротивлениями, передача сигналов через них не рассматривается.

При расчете частотных характеристик частота меняется в пределах, задаваемых в меню АС Analysis Limits.

Если имеется один источник сигнала, то выходные напряжения будут совпадать с частотными характеристиками устройства. Если же источников сигнала несколько, то отклики от каждого сигнала будут складываться как комплексные величины.

После перехода в режим анализа частотных характеристик программа проверяет правильность составления схемы. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному решению системы нелинейных алгебраических уравнений для нахождения режима по постоянному току и открывает окно задания параметров моделирования АС Analysis Limits (рис.П3.5).

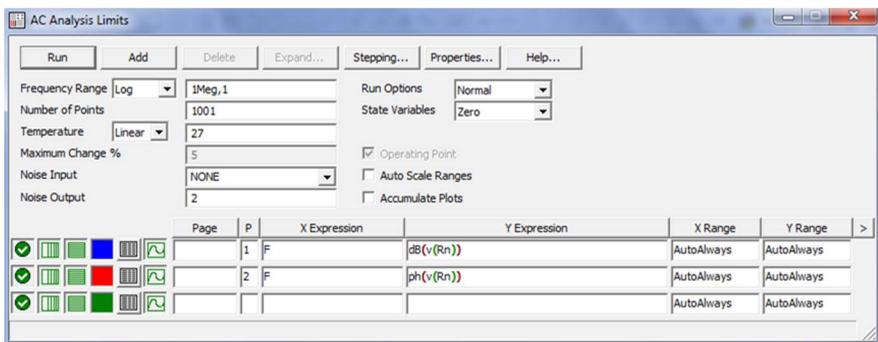


Рис. ПЗ.5. Окно задания моделирования AC Analysis Limits

В данном окне содержатся кнопки запуска анализа (Run), добавления ещё одной строки спецификации вывода результатов (Add), удаления строки (Delete), открытия дополнительного окна для ввода строки большого размера (Expand), открытия диалогового окна задания вариации параметров (Stepping), открытия окна параметров (Properties), открытия окна помощи (Help).

Также в данном окне указывается частотный диапазон для формируемых характеристик (Frequency Range), число строк в таблице файла числового вывода (Number of Points), диапазон изменения температуры (Temperature), максимально допустимое приращение графика первой функции на интервале шага по частоте (Maximum Change, %), имя входного источника сигнала, используемого при расчете шумовых параметров (Noise Input), номера узлов выходных зажимов цепи, в которых вычисляется спектральная плотность напряжения выходного шума схемы (Noise Output).

Ниже находятся поля ввода для задания параметров графиков моделируемых характеристик. Стоит отметить, что

аналогично анализу переходных процессов, здесь значения по оси абсцисс строго определены для частоты. По оси абсцисс представляется возможность задавать значения амплитудно-частотной характеристики исследуемой цепи, как в безразмерных единицах, так и в децибелах, а также значения фазо-частотной характеристики в градусах. Так же в этой области задаётся масштаб для построения графиков.

В результате, при правильно введённых параметрах, при запуске анализа осуществляется переход к окну анализа (рис.П3.6).

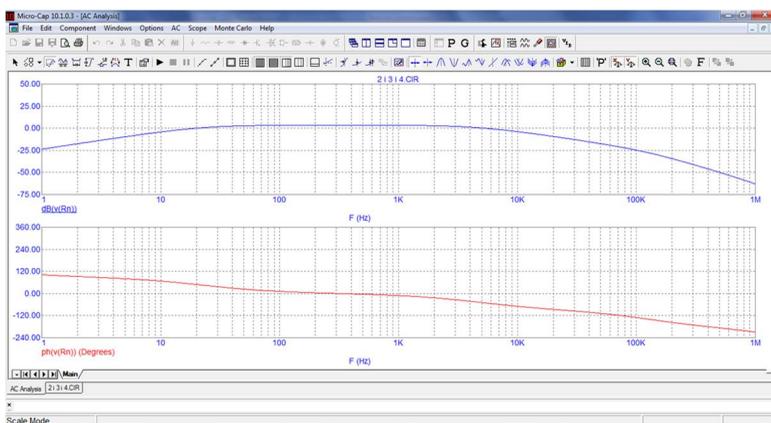


Рис. П3.6. Окно результатов анализа ACAnalysis

В данном окне, так же, как и для других режимов анализа схем есть инструментарий для полноценного анализа полученных результатов, что позволяет достаточно точно и полно исследовать и анализировать моделируемые схемы.

Для анализа спектра сигнала необходимо в окне Transient Analysis Limits задать функцию для нахождения спектра сигнала  $\text{harm}()$  и частотный диапазон (рис.П3.7).

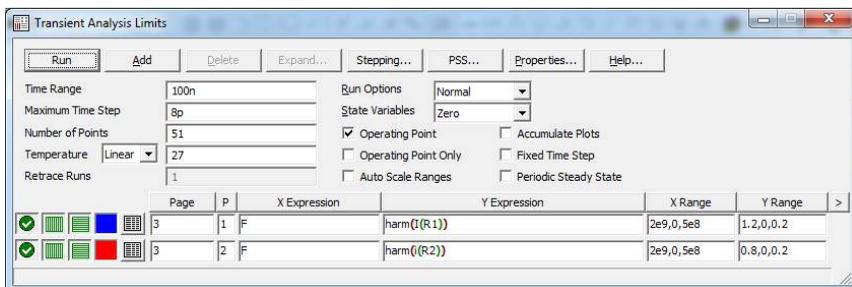


Рис. П3.7. Окно задания моделирования TransientAnalysis Limits

Результаты такого анализа представлены на рис.П3.8.

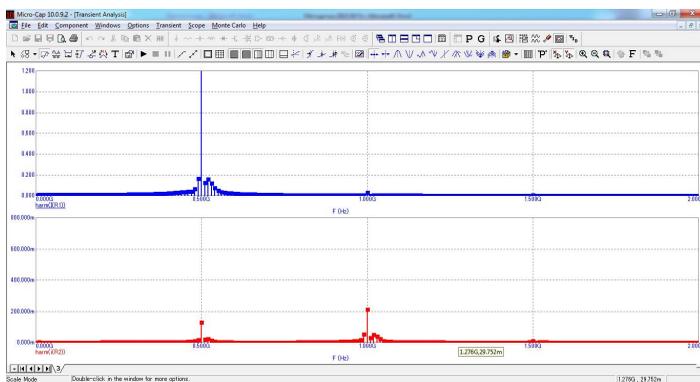


Рис. П3.8. Результаты спектрального анализа ВУЧ

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиопередающие устройства [Текст]: учебник для вузов / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна. - М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.

2. Устройства генерирования и формирования сигналов [Текст]: учебник для вузов / Л.А. Белов, В.М. Богачев, М.В. Благовещенский и др.; под ред. Г.М. Уткина, В.Н. Кулешова и М.В. Благовещенского. – М.: Радио и связь, 1994. – 416 с.

3. Ворона В.А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета [Текст]: учеб. пособие для вузов/ В.А. Ворона. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. - 384 с.

4.[http:// www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com)».Electronic Components Datasheet Search. Адрес: [www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/55396/ALPHA.html](http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/55396/ALPHA.html).

5. Бочаров М.И. Широкополосные умножители частоты защищенных телекоммуникационных систем [Текст] / М.И. Бочаров, О.П. Новожилов // Информация и безопасность, вып. 2, 2010. С. 307-308.

6. Пат. 2257665 Российская федерация, МКИ Н03 В 19/06. Гармонический умножитель частоты / М.И. Бочаров №20044106839/ 09; заявл. 09.03.2004; опубл. 27.07.2005; Бюл. №21.-6 с.

7.Пат.2292629 Российская Федерация, МКИ Н03 В 19/00. Гармонический умножитель частоты/ А.М. Бочаров, А.И. Мушта, О.П. Новожилов - №2005121752/ 09; заявл.11.07.2005; опубл.27.01.2007; Бюл. № 3.-7 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие указания по работе .....	1
2. Домашнее задание.....	1
3. Методические указания к выполнению домашнего задания .....	3
4. Лабораторное задание.....	4
5. Содержание отчета.....	7
6. Контрольные вопросы .....	7
7. Приложение 1. Краткие теоретические сведения.....	10
8. Приложение 2. Описание модели лабораторной установки.....	25
9. Приложение 3. Руководство пользователя программой Micro-Cap 10.....	26
Библиографический список.....	35

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы  
«Моделирование варакторных умножителей частоты»  
по дисциплине «Устройства генерирования и формирования  
сигналов» для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника»  
(программа магистерской подготовки «Радиотехнические  
средства обработки и защиты информации в каналах связи»),  
специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы  
и комплексы»; по дисциплине «Устройства передачи и приёма  
сигналов в СПЦС» для студентов специальности 10.05.02  
«Информационная безопасность телекоммуникационных  
систем» очной формы обучения

Составитель  
Бочаров Михаил Иванович

В авторской редакции

Подписано к изданию 15.09.2016.  
Уч.-изд. л. 2,2. «С»

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14