

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.Э. УНРУ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2015

УДК 004.94:621.372.852 (075.8)
У 607

Рецензенты:

канд. техн. наук, начальник науч.-техн. сектора
ОАО НПО НИИИП-НЗиК *Д.С. Вильмицкий*
д-р техн. наук, проф. НГТУ *В.П. Разинкин*
канд. техн. наук, доц. НГТУ *М.Г. Рубанович*
канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НГТУ *Р.Т. Сулайманов*
начальник КБ ОАО «Электросигнал» *А.П. Шишкин*

Работа подготовлена на кафедре радиоприемных
и радиопередающих устройств для магистрантов 2-го года
обучения факультета радиотехники и электроники, обучающихся
по направлениям «Радиотехника»
и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Унру Н.Э.

У 607 Компьютерное моделирование нелинейных микроволновых
устройств : учеб. пособие / Н.Э. Унру. – Новосибирск: Изд-во
НГТУ, 2015. – 71 с.

ISBN 978-5-7782-2603-6

УДК 004.94:621.372.852 (075.8)

ISBN 978-5-7782-2603-6

© Унру Н.Э., 2015
© Новосибирский государственный
технический университет, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время практически все радиоэлектронные устройства разрабатываются с использованием систем автоматического проектирования [1]. Не являются исключением и микроволновые устройства.

Нелинейный анализ – важная часть современного проектирования электронных схем. Возможность рассчитывать и управлять такими явлениями, как нелинейные искажения, позволяет существенно улучшить технические характеристики проектируемой системы.

В настоящем учебном пособии рассматриваются лишь начальные аспекты использования прикладного компьютерного пакета **Microwave Office** для проектирования нелинейных микроволновых устройств. Оно ориентировано на магистрантов 2-го года обучения при выполнении ими практических работ и расчетно-графической работы по дисциплине «Нелинейные явления в современных микроволновых устройствах», а также в процессе исполнения дипломного проекта.

Материал настоящего учебного пособия предполагает первоначальное знакомство магистрантов с пакетом **Microwave Office** в минимальном объеме [2] и содержит как некоторую теоретическую информацию, так и изложение сугубо практических приемов использования названного пакета для решения прикладных задач. Для самопроверки теоретический материал дополнен вопросами и заданиями. Для более основательного ознакомления с нелинейными явлениями в радиоэлектронных системах и методами их анализа рекомендуется использовать [1, 3–5 и др.]. В конце учебного пособия имеется расчетно-графическое задание.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГБ – гармонический баланс;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ВЗХ – вольт-зарядная характеристика;

ВФХ – вольт-фарадная характеристика;

ИМИ – интермодуляционные искажения;

ЛКМ – левая кнопка мыши;

ПКМ – правая кнопка мыши;

СВЧ – сверхвысокие частоты;

ТПХ – ток-поточковая характеристика (зависимость величины магнитного потока от силы тока);

IP3 – мощность интермодуляционного продукта третьего порядка;

MWO – **Microwave Office**.

1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМ

Важность нелинейных характеристик радиосистем существенно повлияла на развитие методов расчета и создание программ нелинейного схемотехнического анализа. Некоторое время назад единственной возможностью для нелинейного схемотехнического анализа представляла программа **PSPICE**, но теперь у пользователя есть выбор из широкого многообразия программ и алгоритмов, включая применение метода гармонического баланса в частотной области и расчет методом рядов Вольтерра [1].

Программа **PSPICE** выполняет моделирование линейных и нелинейных электронных цепей во временной области, которое называется анализом переходных процессов. **PSPICE** формирует систему нелинейных дифференциально-разностных уравнений в матричной форме и интегрирует их во временной области (рис. 1). Напряжения в схеме определены в ряде дискретных точек времени, при этом численно решается система нелинейных дифференциально-разностных уравнений. Чтобы выполнить интегрирование, **PSPICE** должна получить решение на каждом из многих последовательных шагов времени; для сложных схем это длительный процесс.

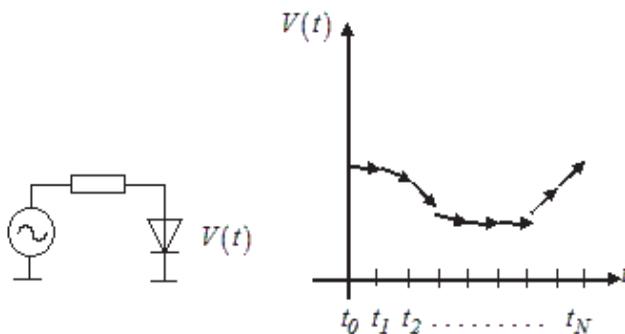


Рис. 1. Анализ во временной области

Самая большая трудность в использовании **PSPICE** для ВЧ- и СВЧ-цепей заключается в следующем: как описывать дисперсионные линии передачи с потерями и другие цепи с распределенными параметрами во временной области? Схемы, анализируемые в **PSPICE**, могут включать в себя идеальные линии передачи, но **PSPICE** не может обрабатывать более сложные неоднородности СВЧ. Это первое ограничение **PSPICE** для расчетов на СВЧ. Вторая проблема – необходимость интегрирования длительных переходных процессов, чтобы достичь установившегося состояния. Это особенно трудная задача для СВЧ-устройств, имеющих большой разброс постоянных времени.

В **MWO** есть два метода анализа нелинейных схем: метод гармонического баланса и метод рядов Вольтерра. Любая схема, которая включает нелинейные элементы, требует нелинейного моделирования. Программа **Voltaire XL** автоматически вызывает лучший метод моделирования в зависимости от требуемых характеристик для того, содержит ли схема нелинейные элементы. И для линейных и для нелинейных схем могут рассчитываться как линейные, так и нелинейные характеристики.

Когда для нелинейной схемы задан расчет линейной характеристики, программа вычисляет смещение по постоянному току, а затем рассчитывает линеаризованную схему относительно режима по постоянному току. Это позволяет для линейных и нелинейных схем задавать анализ любых линейных характеристик, включая переходные процессы в автогенераторах. При выполнении линейного анализа нелинейной схемы все источники сигналов обнуляются, кроме источников постоянного тока.

Однако для анализа нелинейных характеристик не требуется того, чтобы схема имела нелинейные компоненты. Любую нелинейную характеристику можно рассчитать для линейной схемы. Когда нелинейная характеристика задана для схемы без нелинейных элементов, используется более эффективный линейный анализ. Одно очень полезное приложение этой возможности – включение нескольких источников сигнала в линейной схеме и расчет интермодуляции с использованием характеристик переходного процесса нелинейных схем.

Вопросы для самопроверки

1. Каков порядок моделирования линейных и нелинейных электронных схем в **PSPICE**?
2. В чем состоит главная трудность в использовании **PSPICE** для моделирования ВЧ- и СВЧ-цепей?
3. Какие из методов анализа нелинейных схем реализованы в **MWO**?
4. Каким образом **MWO** анализирует линейные и нелинейные схемы?

2. МЕТОД ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

При анализе методом ГБ схема разбивается на две подсхемы: линейную, которая содержит все линейные элементы, и нелинейную, содержащую только нелинейные элементы. Две подсхемы связаны между собой рядом портов (рис. 2).

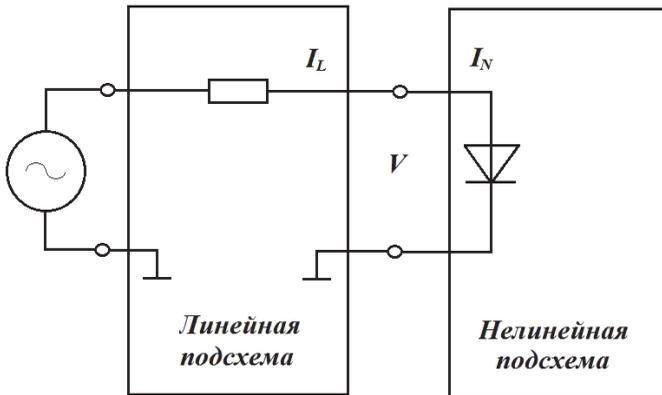


Рис. 2. Анализ схемы методом ГБ

Напряжения в портах соединения – переменные, и программа решает схемные уравнения итерационным методом ГБ. Токи портов используются для того, чтобы определить, является ли найденное решение правильным: если это так, токи в нелинейных I_N и линейных I_L

подсхемах для каждой гармоники удовлетворяют первому закону Кирхгофа.

Напряжения в узлах связи линейной и нелинейной подсхем трактуются как переменные состояния схемы на разных частотах (на нулевой частоте, на фундаментальной частоте и на частотах гармоник). Процесс ГБ итерационно меняет вектор этих напряжений, который удовлетворяет линейным уравнениям линейной подсхемы (обычно описываемых полигармонической матрицей полной проводимости) и нелинейным уравнениям, описывающим нелинейную подсхему. Линейные уравнения легко решаются в частотной области, а нелинейные должны быть решены во временной области. Результаты во временной и в частотной областях связываются преобразованием Фурье.

2.1. Особенности метода гармонического баланса

Метод ГБ – мощный способ анализа высокочастотных нелинейных устройств типа смесителей, усилителей мощности и генераторов. Начиная с 1990 года он стал признанным методом моделирования нелинейных схем. Затем с появлением новых численных методов диапазон применимости ГБ был расширен на существенно нелинейные устройства и на цепи, которые обрабатывают сложные сигналы, состоящие из сотен спектральных составляющих. Метод ГБ имеет следующие основные особенности.

1. Итерационный процесс решения методом ГБ не дает гарантии успеха. Это является существенным недостатком метода ГБ.

2. Если имеется только одна частота возбуждения, то метод ГБ сходится достаточно хорошо. Однако если используются две частоты (например, при расчете интермодуляционных искажений), то как осуществить преобразование между частотной и временной областями? Фурье-преобразования для такого случая существуют, но они не работают так хорошо, как классическое односигнальное преобразование Фурье.

3. Точность преобразования Фурье (особенно для двухсигнального интермодуляционного анализа) ограничена определенными амплитудами сигналов. Слабые интермодуляционные продукты часто теряются в шумах вычислений при расчете преобразования Фурье.

4. Каждая итерация процесса решения методом ГБ требует инверсии матрицы значительных размеров. По этой причине анализ методом ГБ очень медленный; эффективный анализ большой схемы требует большого объема памяти и высокой производительности компьютера.

Несмотря на эти трудности и частично из-за агрессивного маркетинга, моделирующие программы, использующие метод ГБ, стали наиболее популярными средствами анализа нелинейных цепей СВЧ.

В отличие от программ анализа во временной области, наиболее известной из которых является **PSpICE**, программы ГБ анализируют цепи в частотной области.

Развитие технологии моделирования в частотной области мотивировалось следующими неточностями методов анализа во временной области:

- цепи с распределенными параметрами почти исключительно моделируются, измеряются и анализируются в частотной области, и их моделирование в программах типа **PSpICE** ненадежно и неэффективно;

- в практике анализа ВЧ- и СВЧ-схем часто необходимо полигармоническое моделирование, но такие сигналы очень трудно обработать в программах анализа во временной области. Рассмотрим, например, усилитель, который должен тестироваться при воздействии двух синусоид с равными амплитудами, с частотами 9.999 ГГц и 10.001 ГГц. Такое тестирование часто применяется, чтобы определить «точку пересечения третьего порядка». Двухтоновый сигнал на входе может рассматриваться как высокочастотная несущая, моделируемая медленной синусоидой, в данном примере $F_{\text{нес}} = 10 \text{ ГГц}$ и $F_{\text{мод}} = 1 \text{ МГц}$. В этом случае 10 000 циклов несущей соответствует одному периоду огибающей и, кроме того, программа должна выполнить моделирование как минимум несколько периодов, чтобы достигнуть установившегося режима. Чтобы получить неизвестную форму волны, программа анализирует состояние схемы в сотнях тысяч временных точек, и число отсчетов увеличивается с увеличением отношения ширины полосы несущей/огибающей. Поэтому процесс решения медленный, он требует большой оперативной памяти и свободной памяти на жестком диске и часто просто нереален;

- многие высокочастотные цепи высокочастотны, и переходные процессы в них длятся более чем сотни и тысячи периодов ВЧ-колебаний.

Метод ГБ обходит упомянутые проблемы, переводя расчет схемных уравнений в частотную область.

Как показано на рис. 2, схема разбивается на две подсхемы: ту, которая содержит все линейные элементы, и ту, которая содержит нелинейные устройства. Напряжения в портах соединения линейной и нелинейной подсхем рассматриваются как неизвестные величины, так

что цель анализа методом ГБ состоит в том, чтобы найти такой вектор напряжения, чтобы с заданной точностью были удовлетворены законы Кирхгоффа. Способ можно сформулировать так: найти напряжения $V_1(\omega_k), V_2(\omega_k), \dots, V_N(\omega_k)$, чтобы для всех ω_k и для каждого межсоединения выполнялось условие $|I_{linear}(\omega_k) - I_{nonlinear}(\omega_k)| < \varepsilon$.

Здесь ω_k – набор значимых частот в напряжениях на портах; $I_{linear}(\omega_k), I_{nonlinear}(\omega_k)$ – линейные и нелинейные токи на частоте ω_k ; ε – определяет желаемую точность.

Поиск решения состоит из следующих шагов.

1. Определение набора существенных частот, определение желательной точности и определение начального приближения в решении.
2. Вычисление токов, которые вводятся в линейную подсхему.
3. Вычисление токов через нелинейные приборы.
4. Вычисление разности между двумя наборами токов.
5. Определение нового предположения в решении в случае уменьшения разности.
6. Повторение процесса, начиная со второго пункта, пока законы Кирхгоффа не выполняются в достаточной степени.

Преимущества метода ГБ по сравнению с методами решения во временной области состоят в следующем.

1. На каждом шаге итерационного процесса токи, входящие в линейную подсхему, связаны с напряжениями порта соединения Y -параметрами линейной подсхемы. Поэтому компоненты с распределенными параметрами моделируются более естественным методом расчета линейных схем в частотной области.

2. Частотный состав при воздействии двухтоновых сигналов редко когда больше, чем 100 частотных компонентов. Это намного меньше, в отличие от представления во временной области, которое требует сотни тысяч отсчетов.

3. Моделяторы (функциональные компоненты программных пакетов) методом ГБ рассчитывают в условиях установившегося процесса на основании спектрального разложения неизвестных сигналов. Время моделирования поэтому не зависит от длительности переходных процессов схемы.

Зная основные шаги анализа ГБ, можно ответить на ряд практических вопросов.

2.1.1. Выбор значимых частот, скорость и сходимость

Волновая форма нелинейного устройства эквивалентна частотному представлению, состоящему из бесконечного числа частотных компонентов. Если на входе нелинейной схемы действует синусоидальный сигнал с частотой ω_0 , то эти члены соответствуют частотам в наборе $n\omega_0$, $n = 0, 1, \dots, \infty$, как показано на рис. 3.

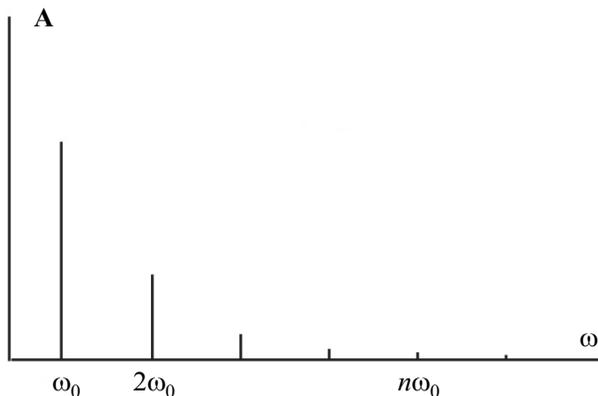


Рис. 3. Спектр в нелинейной схеме

Для моделирования необходимо упростить это представление, отказываясь от компонентов вне $n = N$. Это естественно, поскольку члены с большой частотой отсекаются полосой пропускания схем.

Выбор N зависит от уровня нелинейности. Усилители мощности, например, требуют анализа большего числа гармоник, чем малошумящие усилители, которые ведут себя почти линейно. Для усилителя мощности может потребоваться $N = 8$, в то время как для анализа малосигнального усилителя достаточно $N = 3$.

Усечение спектра несколько более сложное в случае полисигнального возбуждения. Полисигнальное возбуждение предполагает на входе две гармоники или больше, которые не связаны целым числом (например, $\omega_1 = 2\pi \cdot 9.999$ ГГц, $\omega_2 = 2\pi \cdot 10.001$ ГГц). В этом случае можно показать, что частотные компоненты на выходе схемы соответствуют частотам в наборе

$$\pm n\omega_1 \pm m\omega_2, \quad n, m = 0, 1, \dots, \infty.$$

Тогда усеченный гармонический состав имеет вид, показанный на рис. 4.

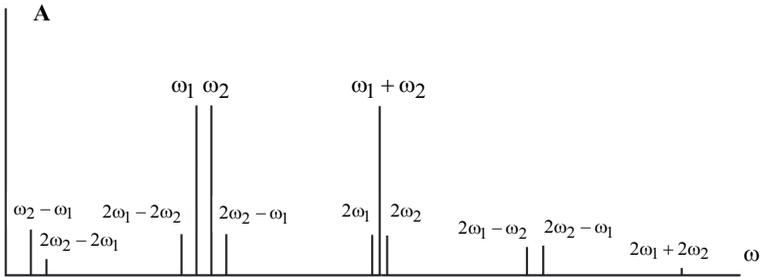


Рис. 4. Спектр сигнала в нелинейной схеме при воздействии двух сигналов с близкими частотами

Спектральные компоненты, которые сохранены в моделировании, имеют частоты $|n\omega_1 + m\omega_2|$, где $m = -M, \dots, M$; $n = -N, \dots, N$. На рис. 4 выполнено усечение при $M = N = 2$. Члены $n\omega_1$ называются гармониками 1-го тона, и точно так же $m\omega_2$ называются гармониками 2-го тона. Множители m и n называются индексами гармоник. Величина $|m| + |n|$ называется порядком продуктов интермодуляции.

Спектр при двухтоновом возбуждении, показанный на рис. 4, может быть упрощен далее, отказываясь от интермодуляционных помех, которые имеют индексы выше, чем $K = |N| + |M|$. В высоколинейном усилителе при двухтоновом возбуждении, например составляющие с частотами $2\omega_2 - 2\omega_1$ и $2\omega_1 - 2\omega_2$, имеют очень маленький уровень. Такие составляющие, при порядке 4 можно исключить из рассмотрения, устанавливая $K = 3$.

Случай анализа с тремя тонами аналогичен двухтоновому случаю. Моделирование с тремя тонами очень полезно для испытания линейности смесителей, где схема находится под действием гетеродина **LO** и двух близко расположенных синусоид **IF** (или **RF**) на входе. В этом случае спектральные компоненты на выходе схемы имеют частоты

$$|m\omega_1 + n\omega_2 + p\omega_{LO}|,$$

где $m = -M, \dots, M$; $n = -N, \dots, N$; $p = -P, \dots, P$.

Как правило, относительно сигнала гетеродина **LO** схема существенно нелинейная, в то время как относительно входных сигналов слабо нелинейная. На практике P должно быть большим чем M и N ; обычно P равно по крайней мере 5 (часто от 10 до 15), в то время как M и N равны 2 или 3.

Независимо от типа моделирования желательно проверять, что частоты, используемые в анализе, обеспечивают точные результаты. Это выполняется экспериментально, постепенно увеличивая число частот, повторяя моделирование и убеждаясь, что результаты моделирования меняются незначительно.

Вопросы для самопроверки

1. Какова основная идея итерационного метода ГБ?
2. Каковы особенности метода ГБ?
3. В какой области анализируются цепи методом ГБ?
3. Из каких шагов состоит поиск решения в методе ГБ?
4. В чем преимущества метода ГБ по отношению к методам решения во временной области?
5. Что называется индексом гармоник и порядком продуктов интермодуляции?
6. Какие имеются рекомендации по выбору количества анализируемых гармоник?

2.1.2. Вычисление токов в нелинейных устройствах

Нелинейные приборы почти всегда описываются временными функциями, зависящими от управляемых напряжений. В методе ГБ, однако, напряжения управления представлены в частотной области. Чтобы рассчитать нелинейные функции прибора, программа **MWO** использует следующую процедуру.

1. Программа преобразует векторы напряжения во временную область, используя преобразование Фурье.
2. Рассчитываются нелинейные устройства во временной области.
3. Применяется обратное преобразование Фурье, чтобы получить комплексные огибающие токов в частотной области.

Из-за частичного использования расчета во временной области метод ГБ иногда называют смешанным (частотно-временным).

Преобразования из временной в частотную форму и обратно дополнительно влекут погрешности расчета. Эти погрешности вызваны

прежде всего явлением выравнивания (**aliasing**), степень которого зависит от уровня нелинейности и числа частотных компонентов, учитываемых в моделировании. В принципе явления выравнивания могут быть уменьшены до незначительных уровней, просто выполняя анализ с очень большим количеством частот. Это, однако, нежелательно, так как ведет к медленному моделированию. Более простой метод для уменьшения эффектов выравнивания основан на том, что в терминах ГБ известно как дополнительная выборка (**oversampling**).

Нижний предел числа выборок во временной области, используемых в оценке нелинейных устройств, равно $2N$ (предел Найквиста), где N – число значимых частот. Чтобы уменьшить выравнивание, пользователь может увеличить число выборок во временной области вне предела Найквиста; результирующее число выборок пропорционально $2N$, и равно, скажем, $2rN$, где r – целое число (дополнительная выборка – **oversampling**). Поскольку нелинейные токи прибора рассчитываются в $2rN$ временных выборках, преобразование Фурье выдает rN частотных компонентов. Окончательно компоненты rN усекаются обратно к исходным N компонентам, которые были выбраны для моделирования.

Дополнительная выборка – эффективное средство уменьшения эффекта выравнивания без существенного увеличения времени моделирования. Вопрос возникает относительно того, когда использовать этот режим и какова оптимальная дополнительная выборка (**oversampling sampling factor**) должна быть.

В **MWO** по умолчанию коэффициент дополнительной выборки равен 2, что достаточно в большинстве моделирований за исключением, возможно, анализа ИМИ в смесителях. В анализе ИМИ смесителя нужно иметь возможность фиксировать интермодуляционные искажения, которые могут быть на 100 дБ меньше, чем самый большой сигнал в схеме (обычно это сигнал гетеродина). Так как сигнал гетеродина очень большой, то даже незначительные результаты выравнивания могут сильно «маскировать» интермодуляционные продукты или вызывать ошибки в вычислении. Это можно предотвратить надлежащим выбором частот для ГБ, приняв больший коэффициент дополнительной выборки.

Задание точности моделирования

Моделирование методом ГБ – итеративный процесс, который заканчивается, когда законы Кирхгоффа для схемы выполнены. Абсолютная мера степени выполнения законов Кирхгоффа оценивается неравенством

$$|I_{linear}(\omega_k) - I_{nonlinear}(\omega_k)| < \varepsilon$$

для каждой заданной частоты ω_k и в каждом порте соединения.

Значения по умолчанию, используемые в **MWO**, достаточны в большей части случаев, но нужно быть осторожным при моделировании цепей, которые работают с очень маленькими, но все-таки существенными сигналами.

2.1.3. Сходимость

Программа делает конечное число попыток для удовлетворения законов Кирхгофа, после чего сообщает о невозможности сходимости или прибегает к переходу в исходное состояние.

Отсутствие сходимости обычно является следствием очень сильной нелинейности анализируемой схемы. В таких случаях трудность, с которой сталкивается программа, – отсутствие «хорошей начальной точки». Обычно решение по постоянному току или решение из линейного приближения дает хорошую начальную точку, но это не имеет место для сильно нелинейных устройств.

Чтобы найти лучшее начальное приближение, программа уменьшает уровень возбуждения (что понижает уровень нелинейности схемы) с целью найти приближенное решение, и после этого использует такое состояние, как начальное приближение для решения.

Адаптивные алгоритмы управления сходимостью в **MWO** вместе с пошаговым изменением уровня сигнала источника приводят к успешной сходимости в большинстве случаев. Иногда, однако, решение не может быть найдено.

Приведем некоторые обычные причины этого и способы их избежать.

Слишком мало анализируемых частот. Если анализируемая схема сильно нелинейна, то это важно для точности и сходимости и при этом следует задать достаточное число анализируемых гармоник в моделировании. Убедиться, что дело обстоит именно так – первый шаг в решении проблем сходимости.

Нелинейное моделируемое устройство. Резкие переходы в нелинейных уравнениях модели и их производных являются частыми источниками несходимости. При использовании заданных пользователем моделей необходимо описывать нелинейные функции и их производ-

ные гладкими функциями. Существуют универсальные методы для аппроксимации таких гладких функций, но проблемы могут еще оставаться, если их параметры введены или извлечены неверно.

Недостаточно итераций. Пользователь обычно устанавливает число итераций, принятых имитатором для нахождения решения. Иногда увеличение этого числа – простой способ достижения сходимости.

Вопросы для самопроверки

1. Каков порядок действия программы **MWO** при расчете нелинейной функции прибора?
2. Запишите меру степени выполнения законов Кирхгоффа, используемую в **MWO**.
3. По каким причинам итерационный процесс может не сходиться? Как ведет себя в этом случае **MWO**?

2.2. Параметры гармонического баланса

Существуют глобальные и локальные опции в методе ГБ. Эти два типа опций отличаются по названию, но во многом остальном идентичны.

Глобальные опции по умолчанию применимы ко всем схемам в проекте. Иногда отдельные схемы будут содержать цепи, для которых устанавливается другой набор параметров, отличных от глобальных, что приведет к более быстрым и точным результатам. В этом случае локальные параметры могут использоваться, чтобы отменить значения по умолчанию.

Выберите ЛКМ **Options > Default Circuit Options...**, для того чтобы вывести диалоговое окно **Circuit Options** для установки глобальных значений по умолчанию. То же самое можно сделать щелчком ПКМ в окне дерева проекта по элементу **Circuit Schematics** и выбрав ЛКМ пункт **Options...** Откроется окно, представленное на рис. 5.

В позиции **Tone 1**, **Tone 2** и **Tone 3** столбика **Number of harmonics** записывают значения, соответствующие величинам M , N и P (см. раздел 2.1.1).

Те же самые позиции столбика **Oversample factor** заполняются значениями r (см. раздел 2.1.2 – дополнительная выборка (**oversampling**)). Значение $r = 2$ рекомендуется в большинстве случаев; возможное исключение – анализ продуктов интермодуляции смесителей.

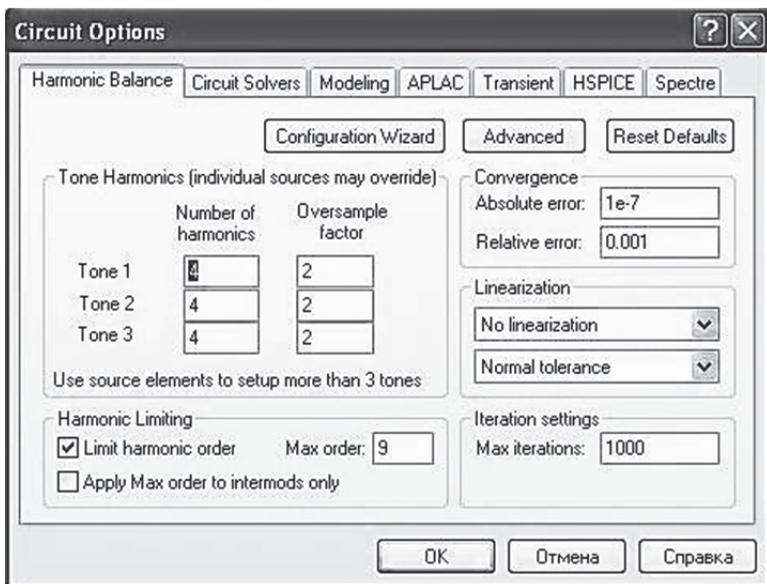


Рис. 5. Окно установки режима ГБ

Величина **Max order** аналогична величине K (в разделе 2.1.1) и выполняет спектральное усечение гармонических составляющих, начиная с более высоких, чем **Max order**.

Под абсолютной (**Absolute error**) ε_{abs} и относительной (**Relative error**) ε_{rel} погрешностями понимают величины

$$|I_L(\omega_k) - I_{NL}(\omega_k)| < \varepsilon_{abs},$$

$$\frac{|I_L(\omega_k) - I_{NL}(\omega_k)|}{|I_L(\omega_k) + I_{NL}(\omega_k)|} < \varepsilon_{rel}.$$

Значения, установленные по умолчанию, достаточны в большинстве случаев.

Число **Max iterations** устанавливает предел числу шагов при поиске решения. Если это число превышено, то сообщается об отсутствии сходимости, и программа возвращается в исходную точку.

Выберите один из методов линеаризации (**Linearization**) наряду с допуском, чтобы ускорить моделирование. Если модели не соответствуют выбранной модели линеаризации в пределах указанного допус-

ка, программа использует приближительную нелинейную модель. По умолчанию используется нелинеаризация (**No linearization**).

Диалоговое окно **Circuit Options** содержит опции, которые можно использовать для изменения сходимости. Щелкните ЛКМ по кнопке **Configuration Wizard** (Маг конфигурации), чтобы открыть диалоговое окно мага конфигурации ГБ (**HB Configuration Wizard**), показанное на рис. 6.

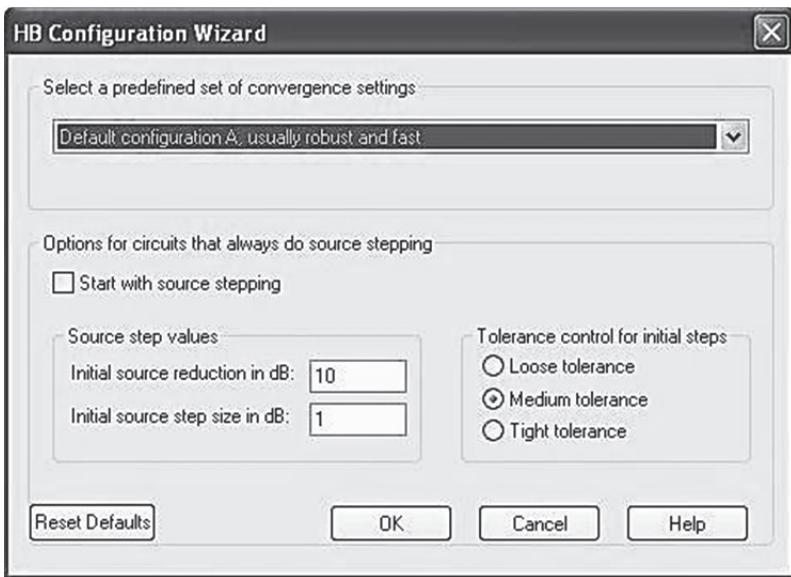


Рис. 6. Окно **HB Configuration Wizard**

В оконце **Select a predefined set of convergence settings** (Выбор предопределенного набора параметров настройки сходимости) можно выбрать, какую вычислительную стратегию следует использовать. Если схема сходится медленно или плохо, то можно выбрать другую стратегию.

Скорость моделирования можно ускорить выбором **Start with source stepping** (Начать с исходным продвижением). При выборе этой опции программа начинает моделирование, уменьшая уровень возбуждения порта на величину, определенную в **Initial source reduction in dB** (Начальное уменьшение источника в дБ), а затем увеличивает его уровень шагом, заданным в **Initial source step size in dB** (Размер начального шага источника в дБ). Таким образом, можно изменить до-

пуск ошибки для начальных шагов мощности при помощи **Tolerance control for initial steps** (Допуск управления для начальных шагов).

Чтобы получить доступ к более продвинутым опциям ГБ, щелкните в окне **Circuit Options** (см. рис. 5) ЛКМ по кнопке **Advanced** (Продвинутый) и появится диалоговое окно **Advanced Harmonic Balance Options** (рис. 7).

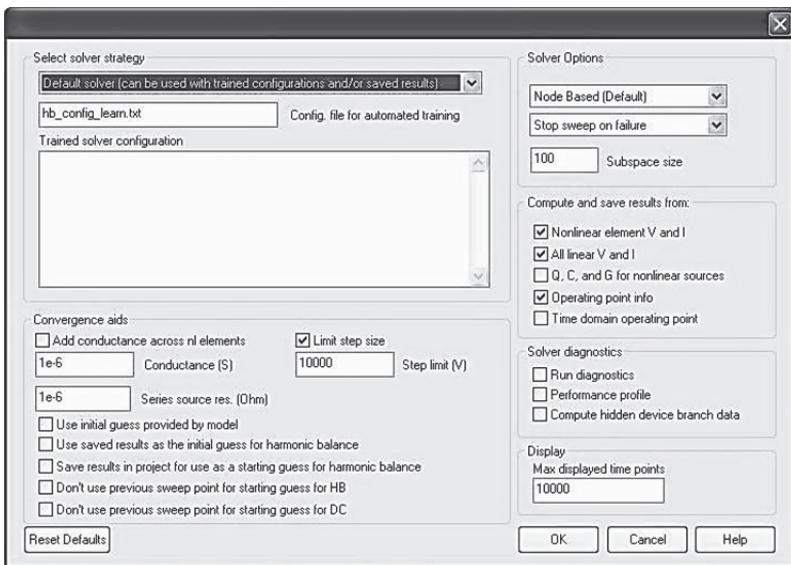


Рис. 7. Диалоговое окно **Advanced Harmonic Balance Options**

Выберите **Save results in project for use as a starting guess for harmonic balance** (Сохранить результаты в проекте для использования в качестве стартовых значений в ГБ) и **Use saved results as the initial guess for HB** (Использовать сохраненные результаты в качестве начальных значений для ГБ), чтобы ускорить сходимость во время настройки, оптимизации или анализа результата. Эти опции могут также вызвать проблемы сходимости. Например, если схема изменилась достаточно сильно между моделированиями, так что старые результаты – плохое начальное предположение, то моделирование, возможно, не сойдется. Точно так же вы можете выбрать **Don't use previous sweep point for starting guess for HB** (Не использовать предыдущие точки для начального приближения в ГБ) и **Don't use previous sweep points for starting guess for DC** (Не использовать предыдущие точки для

начального приближения в **DC** (постоянному току)) для более быстрой сходимости во время настройки, оптимизации или анализа результата, если схема существенно изменилась между моделированиями.

Под заголовком **Solver Options** можно выбрать **Node Based (Default)** (Базовый узел (По умолчанию)) или **Port Based (Occasionally faster)** (Базовый порт (Иногда быстрее)). **Node Based (Default)** (Базовый узел (По умолчанию)) использует узловой анализ схемы, тогда как **Port Based** (Базовый порт) лишь вычисляет напряжения в портах. Можно выбрать вычислитель **Port Based** (Базовый порт) для схем, где сходимость проблематична. По умолчанию вычислитель останавливает свипирование при отказе сходимости или моделирования. Выбором **Continue sweep on failure** (Продолжить свипирование при отказе) выполняются полное свипирование вычислителя. Можно выбрать **Disable partial results** (Отключать частичные результаты), если нежелательно выводить на экран частичные результаты при отказе сходимости, отказе моделирования или прерванного моделирования.

Под заголовком **Compute and save results from** (Вычислить и сохранить результат) можно выбрать, какие узловые напряжения и токи сохраняются после моделирования. По умолчанию все напряжения и токи, связанные с нелинейными элементами, сохраняются так же, как все линейные узловые напряжения и токи. Для схем с большими количествами линейных компонентов, но небольшим количеством нелинейных элементов очищение поля **All linear V and I** (Все линейные **V** (напряжения) и **I** (токи)) может сохранить время моделирования и память. Выбором **Q, C, and G for nonlinear sources** (**Q**, **C** и **G** для нелинейных источников) также можно экономить заряд, емкость и проводимость для нелинейного тока и источников заряда. Сохранение чрезмерного количества результатов ограничивает размер анализируемой схемы из-за потребления памяти.

Под заголовком **Convergence Aids** (Приспособления конвергенции) можно установить значения последовательного сопротивления ряда (10^{-6} Ом по умолчанию), которые будут вставлены вычислителем между линейными и нелинейными частями схемы. Выберите **Add conductance across nl elements** (Добавить проводимость поперечных **nl** элементов) через флажок, чтобы добавить большее (10^6 Ом по умолчанию) сопротивление через все нелинейные элементы.

Вопрос для самопроверки

Что в **MWO** понимается под абсолютной и относительной погрешностями?

2.3. Установки гармонического баланса

Схемы, которые включают нелинейные элементы, требуют нелинейного моделирования или методом расчета по постоянному току, или методом ГБ. **MWO** вызывает соответствующий вычислитель автоматически, когда заданы рассчитываемые характеристики.

Если требуется рассчитать линейную характеристику в нелинейном устройстве, вычислитель рассчитывает линейную характеристику, определяя точку смещения, и затем линеаризует схему. При выполнении линейного анализа нелинейной схемы все источники, кроме источников **DC**, устанавливаются равными нулю.

2.3.1. Задание нелинейных частот

Анализ с одиночным тоном

Моделирование с одиночным тоном выполняется на наборе частот, определенных как $n\omega_0$, где $n = 0, 1, 2, \dots, N$.

Фундаментальная частота определяется в списках **Nonlinear Frequencies** (Нелинейные частоты) или **Project Frequency** (Частоты проекта).

Ряд возбуждений может быть задан для анализа с одной гармоникой, включая синусоидальный, прямоугольный сигнал и сигнал, заданный в файле.

Двухтоновый сигнал

Двухтоновое моделирование выполняется на наборе частот, определенных как $|m\omega_1 + n\omega_2|$.

Фундаментальная гармоника **tone-1** ω_1 управляется (обычно) через **Nonlinear Frequencies** (Нелинейные частоты) или **Project Frequency** (Частоты проекта). Имеется несколько способов определить фундаментальную гармонику **tone-2**. Некоторые источники сигнала позволяют непосредственное задание ω_2 , другие позволяют задать ω_2 как смещение от **tone-1**. Фундаментальная частота второго тона может, кроме того, быть определена как функция основной частоты первого тона. Чтобы задать **tone-2** как функцию **tone-1**, можно использовать зарезервированную переменную **_FREQH1**. Например, если $\Delta\omega = 2\pi \cdot 0.1$ ГГц, то можно определить ω_2 , вводя **_FREQH1+0.1** для частоты генератора **tone-2**.

Трёхтоновый анализ

Трёхтоновое моделирование использует набор

$$|m\omega_1 + n\omega_2 + p\omega_3|.$$

Фундаментальные частоты могут быть определены непосредственно в источнике (элемент **PORTFN**) или комбинацией одиночных и двухсигнальных элементов. Например, **tone-1** и **tone-2** могут быть определены элементом **PORT2**, в то время как **PORTFN** может использоваться для определения третьего сигнала.

Мультитоновый анализ

Пакет **MWO/AO** версии 6 или более поздних версий поддерживает моделирование с одного до восьми тонов.

Опции **Number of Harmonics** (Количество гармоник) и **Over-sample Factor** (Дополнительная выборка) для тонов 4–8 определяются непосредственно на порту (или источнике напряжения или тока). Двойным щелчком на символе элемента в схеме вызывается диалоговое окно **Element Options**, затем необходимо щелкнуть по кнопке **Show Secondary**. Параметры **NHarm** и **NSamp** устанавливают число гармоник числа и фактор дополнительной выборки соответственно.

2.3.2. Источники

В пакете **MWO/AO** имеются два типа источников: портовые и дискретные. Дискретные источники, которые имеются в папке **Sources** в закладке **Elements**, – идеальные источники напряжения или тока. Портовые источники, которые имеются в папке **Ports** в браузер (закладке) **Elements**, определены их номинальной мощностью и полным сопротивлением.

Портовые источники, во-первых, имеют удобное определение мощности источников; во-вторых, они определяют входы и выходы схемы, позволяя использовать ее как подсхему в пределах другой схемы.

Имеется несколько типов портов, которые используются, чтобы определить возбуждения. Порт добавляется в схему перемещением его из браузера (закладки) **Elements**. Параметры портов задаются двойным щелчком по элементу порта и изменяют **Port Type** (Тип порта) в диалоговом окне **Element Options** закладки **Port**, например, простой нагрузочный элемент (пассивный порт) на главной панели инструментов .

3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

3.1. Анализ усилителя с одиночным тоном

Рассмотрим схему усилителя при возбуждении с одиночным тоном.

1. Стандартным для **MWO** способом введите схему усилителя, показанную на рис. 8. Дайте ему имя **Swept_Power**.

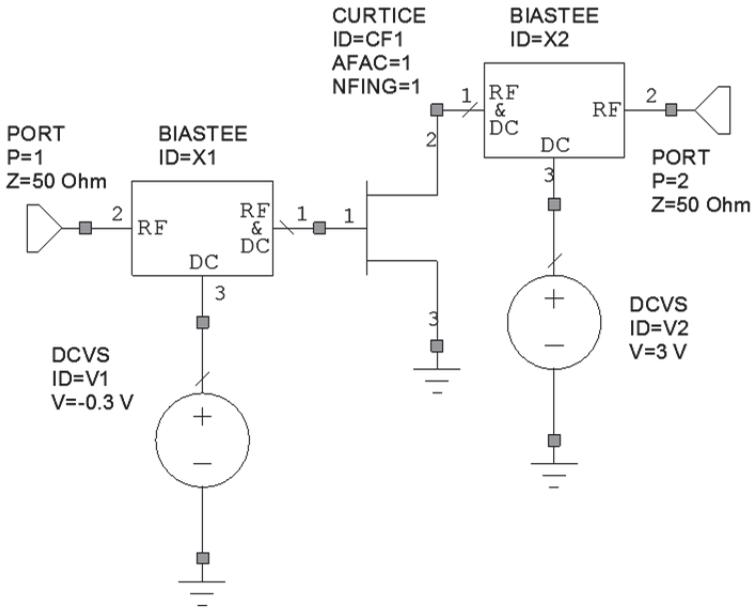


Рис. 8. Усилитель мощности при воздействии одного гармонического сигнала

2. Во вкладке **Frequencies** диалогового окна **Project Options** удалите, если необходимо, установленные по умолчанию значения и установите моделирование для одиночной частоты, как показано на рис. 9, и щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

3. Преобразуйте входной порт в нелинейный источник сигнала. Для этого выполните двойной щелчок ЛКМ по элементу **PORT** в окне схемы. Откроется окно, показанное на рис. 10, в нем выполните необходимые изменения.

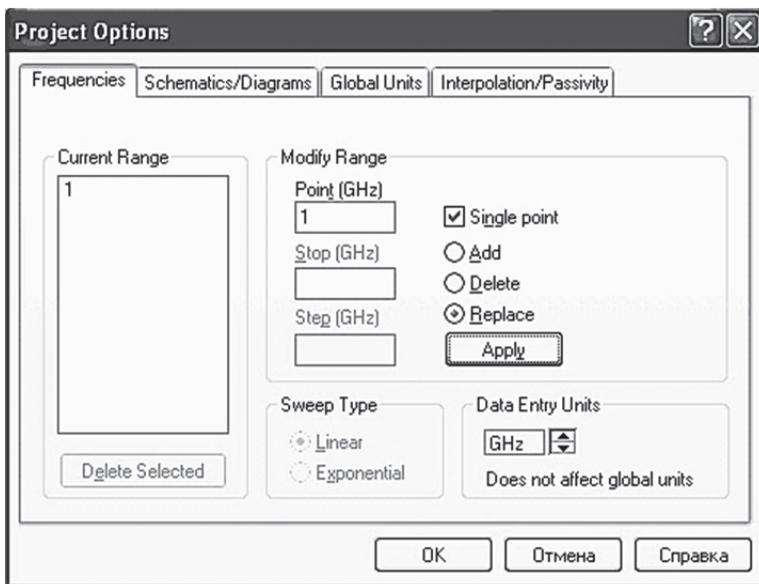


Рис. 9. Диалоговое окно установки частот нелинейного анализа

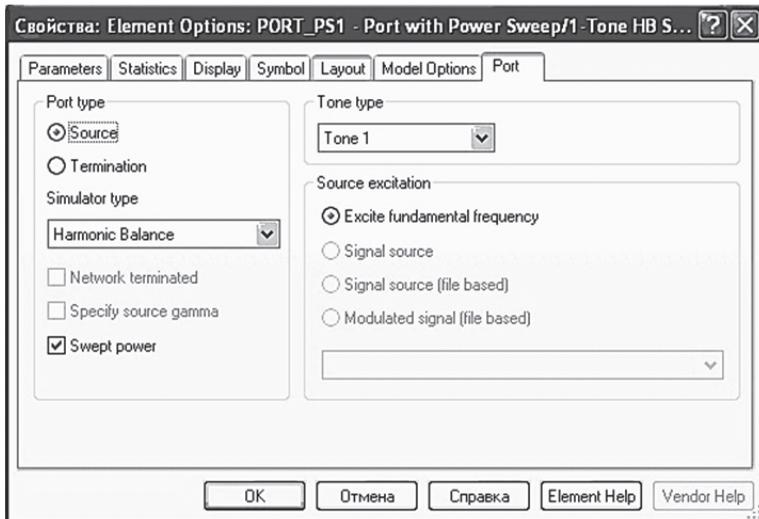


Рис. 10. Преобразование входного порта в нелинейный источник сигнала

4. Введите значения «-15», «5», и «1» соответственно для **PStart**, **PStep** и **Pstop** во вкладке **Parameters** того же окна **Element Options** (рис. 11). Можно также добавить порт непосредственно к схеме путем перемещения одного из них из категории **Ports > Harmonic Balance** в браузере элементов в схему. В заключение щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

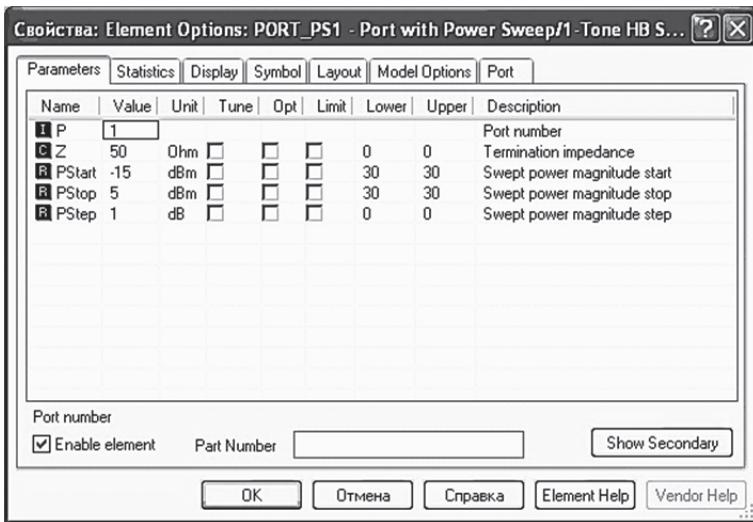


Рис. 11. Вид вкладки **Parameters** окна **Element Options**

5. Проверьте, правильно ли установлены опции моделирования, щелкнув ПКМ по **Circuit Schematics** в **Project Browser** и выбрав ЛКМ пункт **Options...** (рис. 12). Во вкладке **Harmonic Balance** для **Tone 1** установите «7» как число гармоник и оставьте остальные опции по умолчанию. Щелкнув ЛКМ по кнопке **Configuration Wizard**, установите флажок напротив записи **Start with source stepping**. В заключение дважды щелкните ЛКМ по кнопкам **OK**.

6. Стандартным для **MWO** образом добавьте прямоугольный график в браузере проекта (**Project Browser**).

7. Щелчком ПКМ стандартным для **MWO** способом добавьте к графику измерения (**Add Measurement**). В диалоговом окне **Add Measurement** выберите **Nonlinear > Power** как тип измерений (**Measurement Type**) и **LSSnm** (см. приложение) как измерение (**Measurement**). Эти опции формируют **S**-параметры большого сигнала от порта **m** к порту **n**, в диапазоне мощности. **S**-параметры могут быть измерены

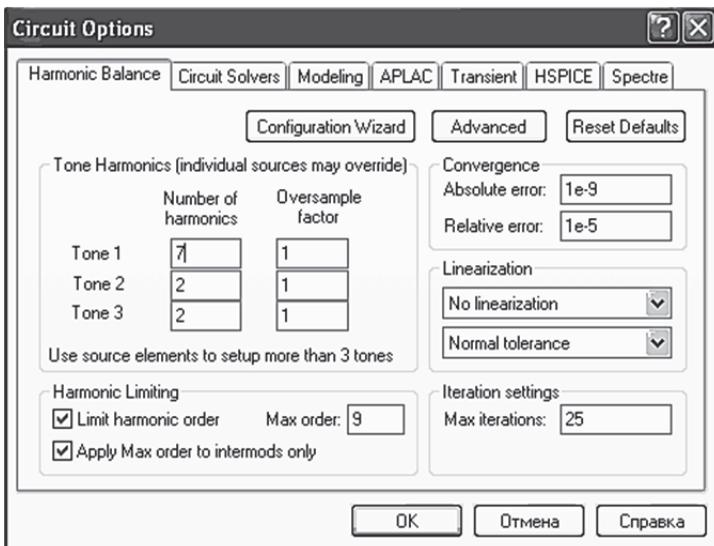


Рис. 12. Окно вкладки **Harmonic Balance** окна **Circuit Options**

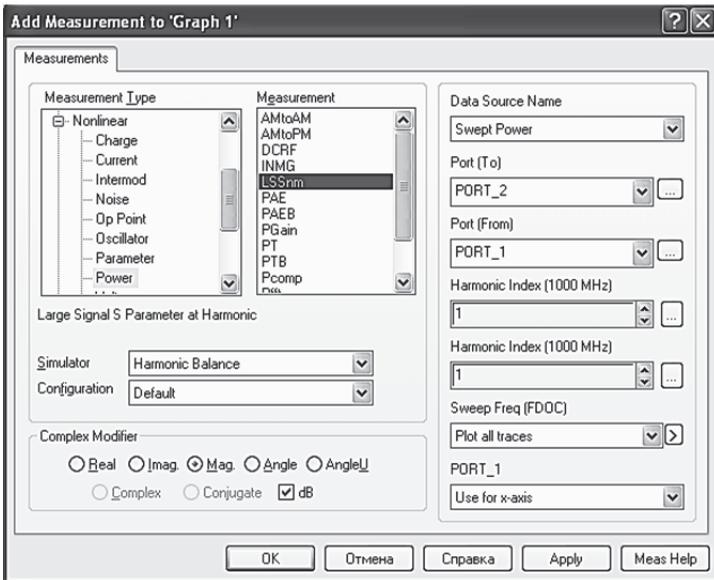
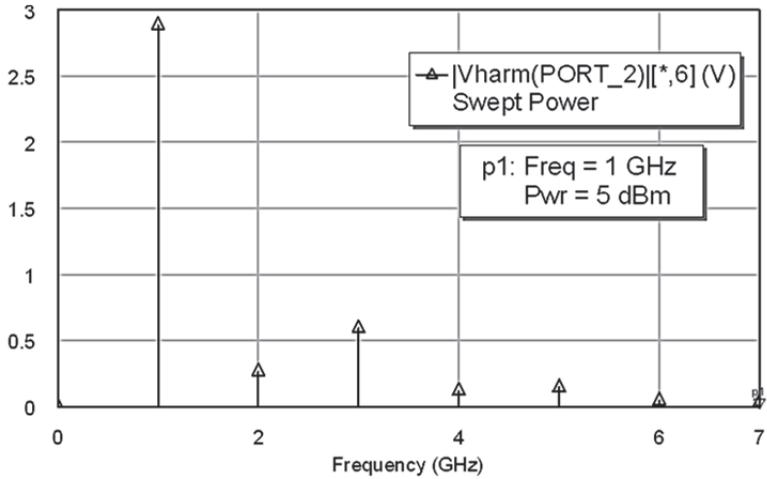
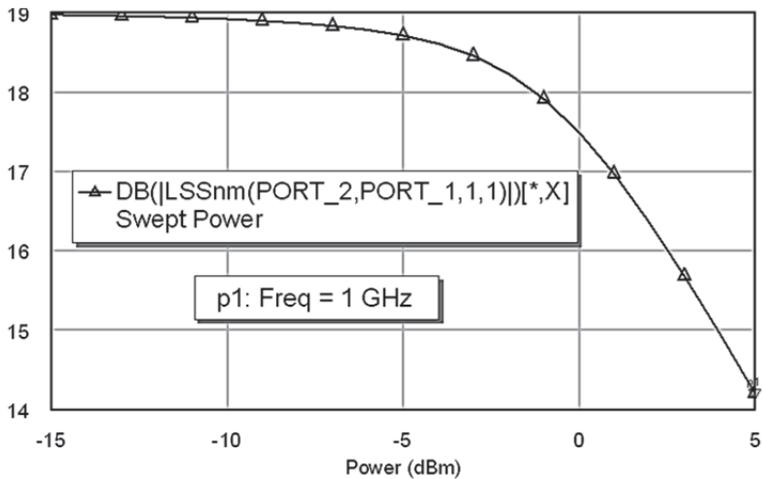


Рис. 13. Окно **Add Measurement**



a



b

Рис. 14. Результаты моделирования

на любой гармонике, принятой во внимание вычислителем (в данном случае 7 гармоник фундаментального сигнала). На рис. 13 показано окно **Add Measurement**, внесите остальные необходимые изменения и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

8. Чтобы получить спектр напряжения на выходе, добавьте другой граф и к нему измерение. Выберите **Nonlinear > Voltage** как тип измерений (**Measurement Type**); **Vharm** (см. приложение) как **Measurement**; **PORT_2** как **Measurement Component** и **Pwr = 5 dBm** как **PORT_1**. Уберите, если необходимо, флажок напротив **dB** в оконце **Complex Modifier** и затем щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

9. Запустите моделирование, щелкнув по кнопке **Analyze** на панели инструментов или нажимая на клавишу **F8**, или выбрав **Simulate > Analyze**. Спектр напряжения и график характеристики сжатия должны быть похожими на графики, изображенные на рис. 14, *a* и *б* (частота должна иметь глобальную единицу измерения **GHz**).

3.2. Двухтоновый анализ усилителя

Выполним анализ того же самого усилителя при двухсигнальном возбуждении.

Можно создать другой проект или создать другую схему в существующем проекте и копировать-вставлять схему в новое схемное окно.

1. Примем, что два тона располагаются на 2.99 ГГц и 3.01 ГГц, и зададим их во вкладке **Frequencies** (частоты) диалогового окна **Options** (опции) для вновь созданной схемы, как показано на рис. 15. Далее следует щелкнуть ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

2. Самый простой способ включить двухчастотный источник – это включение при помощи портов. Можно выбрать двухчастотный источник из **Ports** в браузере элементов (**Element Browser**). Также можно отредактировать существующий элемент **PORT_PS1**, дважды щелкнув по нему ЛКМ, и на вкладке **Port** диалогового окна **Element Options** выбрать новый тип порта. Выделите **Tone 1 & 2** в оконце **Tone Type** и щелкните по кнопке **OK**. **PORT_PS1** изменится на **PORT_PS2** – двухчастотный источник изменяющейся энергии. На рис. 16 показана схема усилителя. Если необходимо, в окне **Element Options** (вкладка **Parameters**) отредактируйте параметры порта: **PStart** = "-20 dBm", **PStop** = "10 dBm", **PStep** = "1 dB" и **Fdelt** = "0.02 GHz". Завершить работу с окном **Element Options** следует щелчком ЛКМ по кнопке **OK**.

3. В ниспадающем меню **Schematics** выберите ЛКМ пункт **Options...** (Опции) для открытия диалогового окна **Options** (Опции). На вкладке **Harmonic Balance** (Гармонический баланс), рис. 17, введите «5» в ячейки **Tone 1** и **Tone 2** столбика **Number of Harmonics**. Снимите флажок **Use Project Defaults** (Использовать установки проекта по умолчанию). Выполните щелчок ЛКМ по кнопке **OK**.

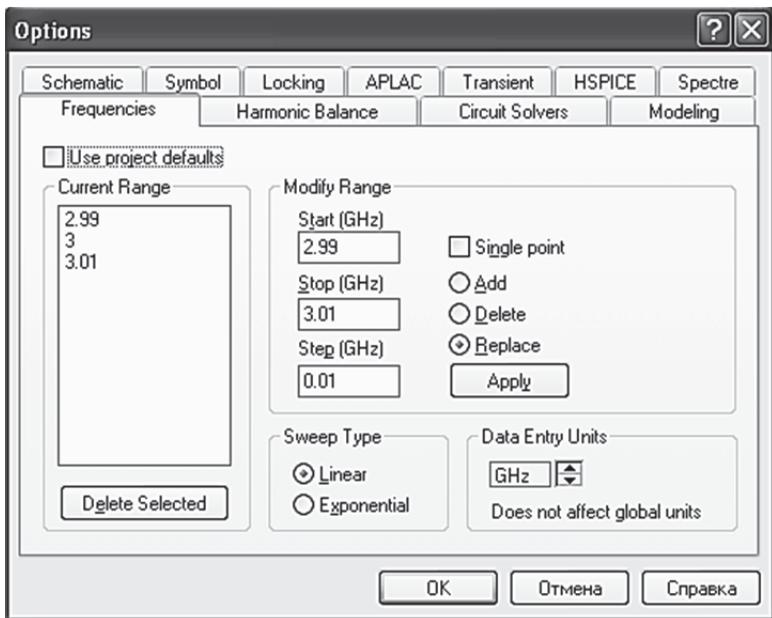


Рис. 15. Вид вкладки **Frequencies** (частоты) диалогового окна **Options** (опции)

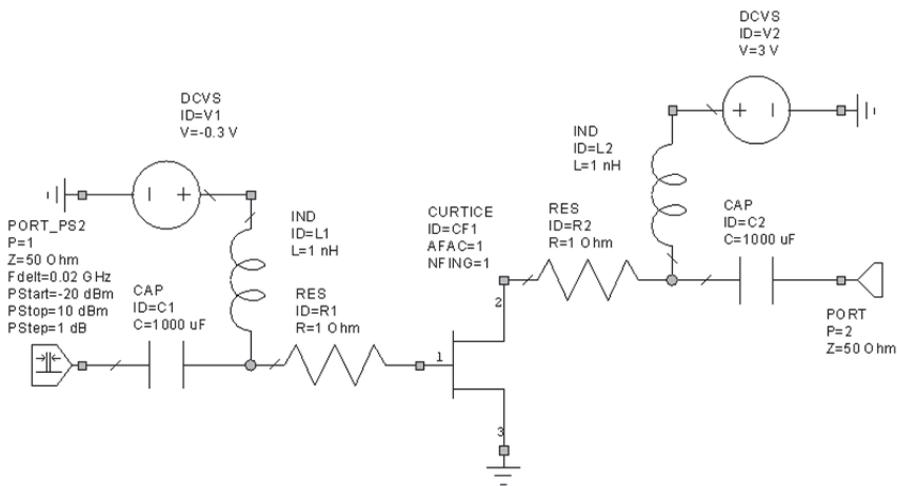


Рис. 16. Схема усилителя с двухтоновым возбуждением

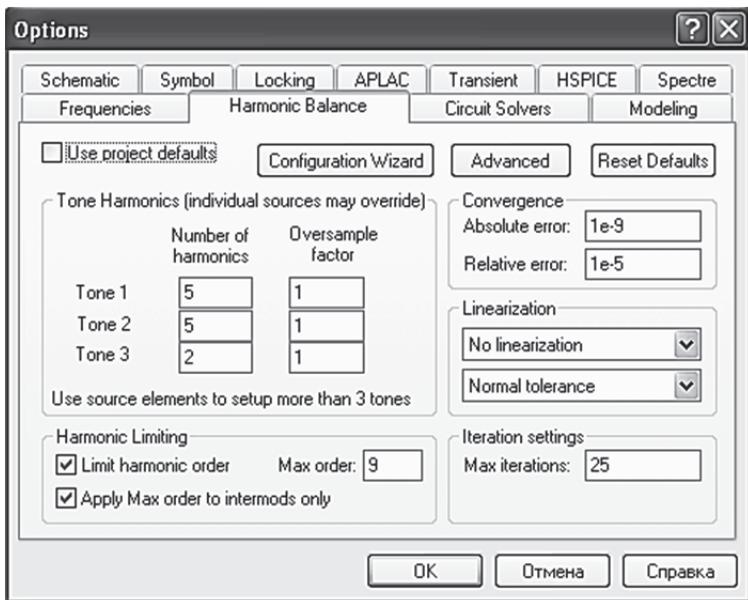


Рис. 17. Вкладка **Harmonic Balance** (Гармонический баланс) окна **Options**

4. Стандартным для **MWO** добавьте новый прямоугольный график к проекту и к графику добавьте измерения. Выберите в диалоговом окне **Add Measurement** (Добавить измерения) пункт **Nonlinear > Power** как **Measurement Type** (Измеряемый тип) и выберите **Pcomp** как **Measurement**, что показано на рис. 18. Выберите название схемы (в данном примере это **Swept Power2**) в оконце **Data Source Name**, выберите **PORT_2** в оконце **Measurement Component** (Измеряемый компонент) и щелкните ЛКМ по стрелке справа от опции **Harmonic Index** (Индекс гармоника) для выбора 1 для первой и 0 – для второй гармоника.

После щелчка ЛКМ по кнопке "...", расположенной справа от **Harmonic Index** (Индекс гармоника), в открывшемся окне выберите частоту 2.99 ГГц как основную (рис. 19). После этого щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

В заключение в оконце **Sweep Freq** выберите **Freq = 2.99 GHz** и **Use for x-axis** (Использовать для оси **OX**) для оконца **PORT_1**. Установите флажок слева от **dBm** в элементе **Complex Modifier**. Наконец, следует щелкнуть ЛКМ по кнопке **OK**.

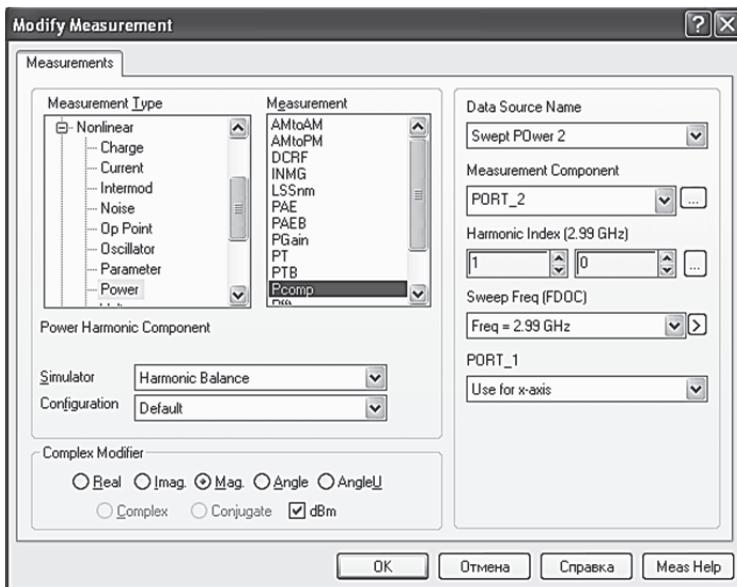


Рис. 18. Вид окна **Add Measurement** (Добавить измерения)

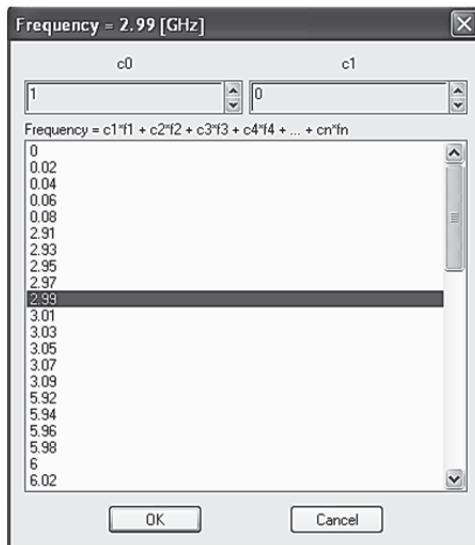


Рис. 19. Окно **Frequency =**

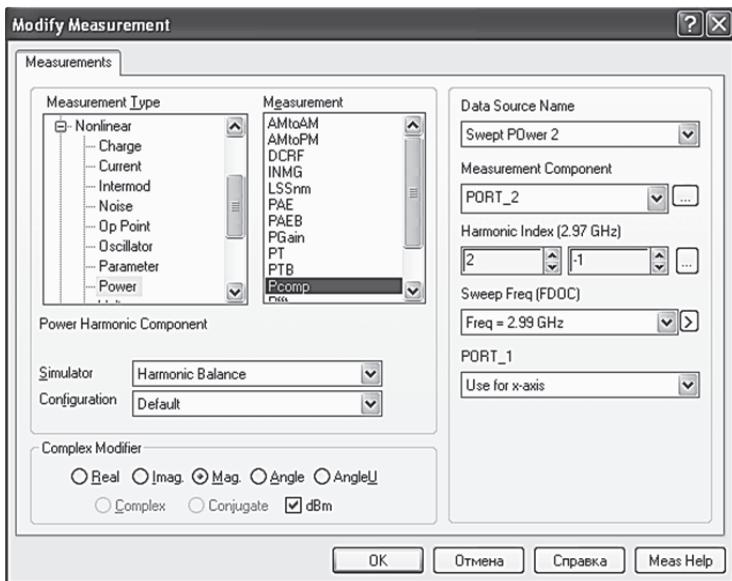


Рис. 20. Вид окна **Add Measurement** (Добавить измерения)

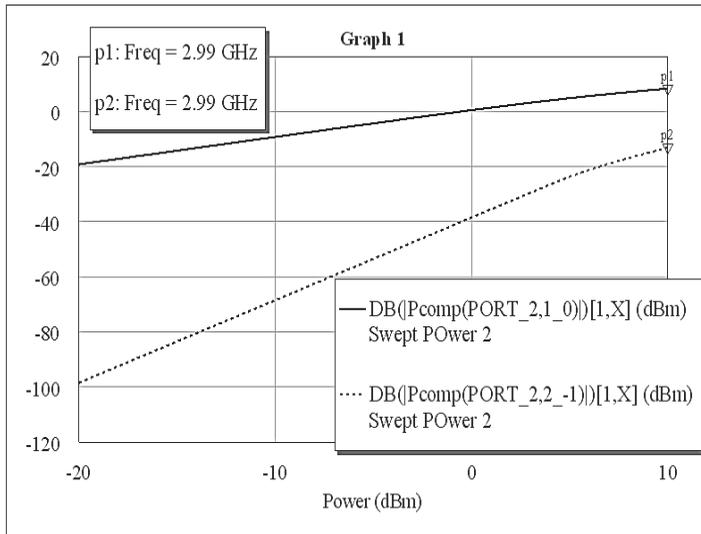


Рис. 21. Результаты моделирования

5. Добавьте к графику еще одно измерение для мощности интермодуляционного продукта, используя на этот раз пару значений (2, -1) для окна **Harmonic Index** (Индексы гармоник), рис. 20.

6. Запустите моделирование, результаты которого должны быть похожи на рис. 21.

3.3. Трехтоновый анализ смесителя

Этот пример демонстрирует возможности анализа с тремя тонами **MWO/AO**. Он основан на проекте **FET_Mixer.emp** в подкаталоге **Examples** программного каталога **MWO/AO**.

1. Чтобы начать моделирование, сохраните этот пример под другим именем, например **FET_Mixer_3t.emp**.

2. Создайте другую схему под именем «**Three tone**» и скопируйте туда схему из «**FET Mixer**».

3. Установите документальные частоты документа для новой схемы на значение 1890 МГц.

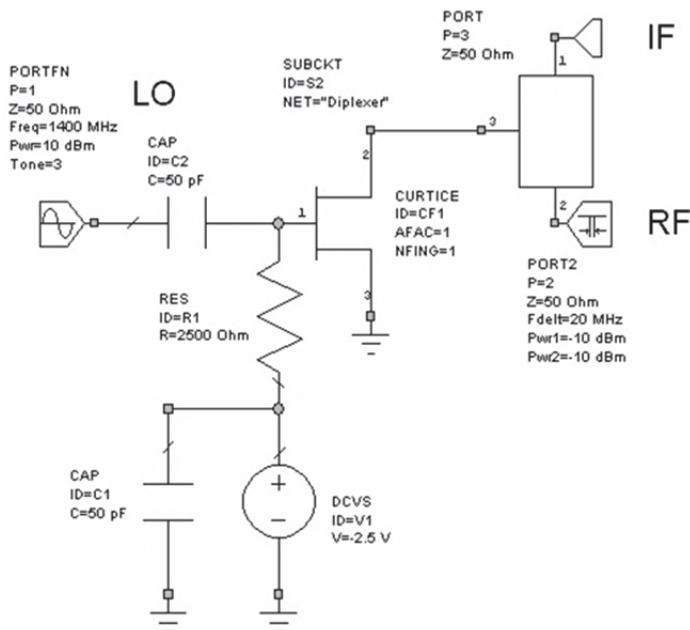


Рис. 22. Схема смесителя на полевом транзисторе

4. Отредактируйте **Port 1 (LO)** источник, как описано ранее, установив (вкладка **Port**) **Tone type** на **Tone 3**.

5. Установите частоту **Port 1** на 1400 МГц (вкладка **Parameters**). Отредактируйте **Port 2** (вход), установив **Tone type** на **Tone 1 & 2** (вкладка **Port**), **Pwr1 = Pwr2 = «-10 dBm»** и **Fdelt = «20 МГц»** (вкладка **Parameters**).

Трехтоновая схема должна теперь быть похожа на схему, показанную на рис. 22.

6. Щелкните ПКМ по элементу **Circuit Schematics** и в нем ЛКМ выберите пункт **Options...**. Откроется окно **Circuit Options**, показанное на рис. 23 (вкладка **Harmonic Balance**), в котором следует установить: число гармоник для первого тона (**Tone 1**) = 3, число гармоник для второго тона (**Tone 2**) = 3, число гармоник для третьего тона (**Tone 3**) = 11, **Max order** установить на 11 и затем щелкнуть ЛКМ по кнопке **OK**.

7. Добавьте выходной график и в нем прибавьте характеристику **Pharm** из категории **Nonlinear Power**, как показано на рис. 24, чтобы вывести спектр в порту **IF (Port 3)**. В заключение выполните щелчок ЛКМ по кнопке **OK**.

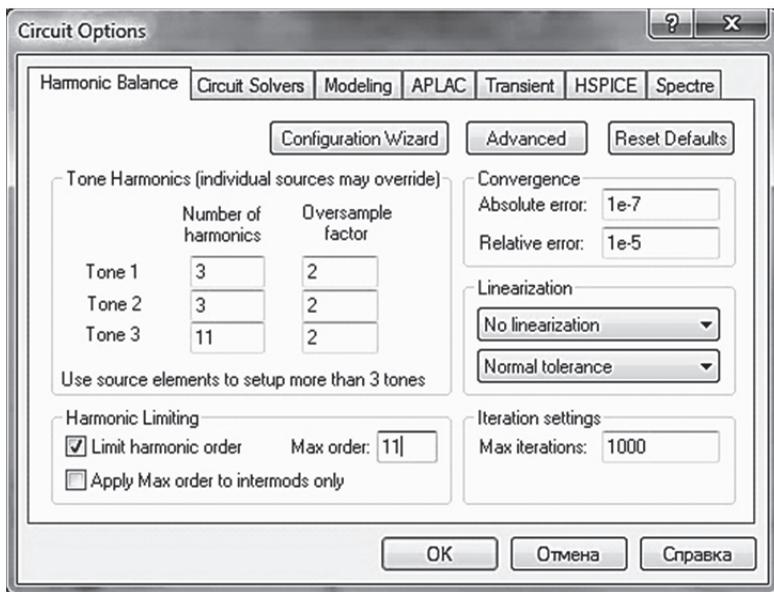


Рис. 23. Окно **Circuit Options**

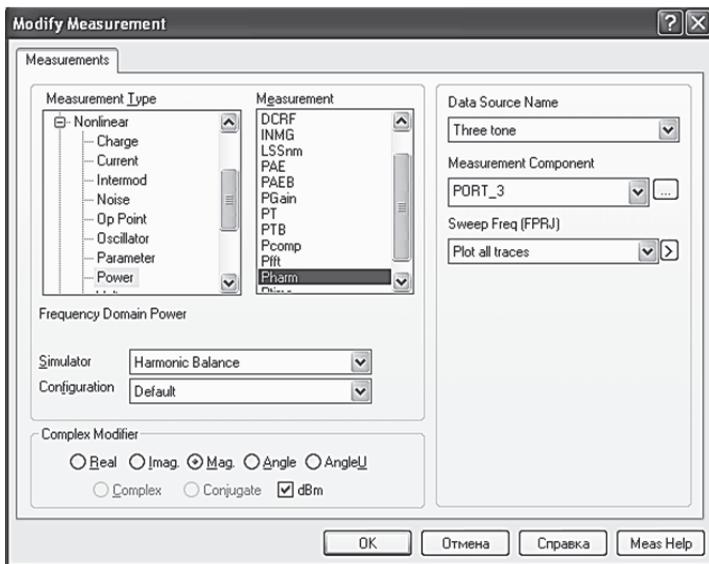


Рис. 24. Вид окна **Modify Measurement**

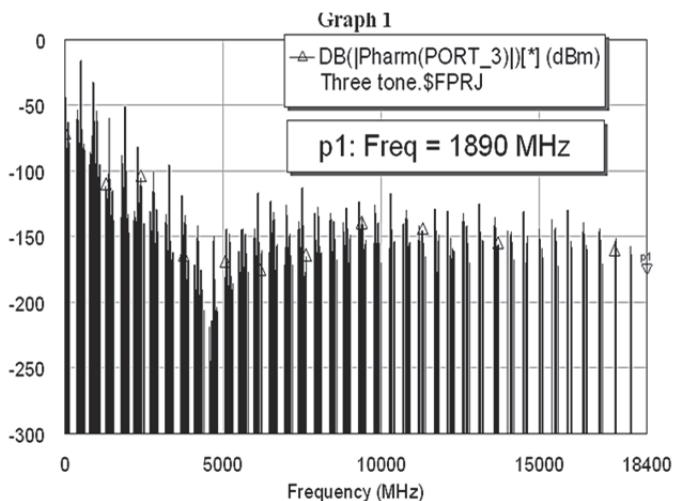


Рис. 25. Спектр на выходе смесителя на полевом транзисторе

8. Стандартным для **MWO** способом запустите моделирование. Спектр должен иметь вид, показанный на рис. 25.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРИБОРОВ

Рассмотрим на следующем примере, как **MWO** используется для моделирования усилителя мощности, используя метод ГБ. Он включает следующие основные шаги:

- использование нелинейной модели из библиотеки элементов;
- расчет ВАХ;
- добавление элементов смещения для расчета напряжений и токов;
- импортирование входной/выходной согласующей цепи;
- добавление портов ГБ к схеме;
- создание иерархической схемы, используя подсхемы;
- расчет спектрального состава на выходе;
- расчет динамической нагрузочной линии.

Создайте новый проект с именем «**NL**», установите единицы измерения и другие глобальные опции. Для создания схемы выберите: **Project > Add Schematic > New Schematic...** . В появившемся окне напечатайте «**IV Curve**» и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**. Появится окно схемы.

Для размещения модели нелинейного элемента из библиотеки сделайте следующее.

1. Откройте вкладку **Elements** и среди биполярных транзисторов (**BJT**) в разделе **Нелинейные элементы (Nonlinear)** найдите транзисторную модель **GBJT** и стандартным для **MWO** образом поместите ее в окно схемы.

2. Двойным щелчком ЛКМ по элементу **GBJT** в схемном окне откройте окно **Element Options**. Щелкните ЛКМ по кнопке **Show Secondary**. Появятся параметры модели транзистора, установленные по умолчанию. Их можно изменять. В данном примере мы будем использовать модель, чьи параметры уже изменены. Щелкните ЛКМ по кнопке **Отмена**. В закладке **Project** щелкните ПКМ по элементу **Circuit Schematics**, и в открывшемся окне ЛКМ выберите пункт **Import Schematic...**

3. Перейдите в каталог, содержащий стандартные примеры исполнения схем. В нашем случае: **C:\Program Files\AWR\AWR2009\Examples**.

4. Выберите файл **nonlinear_start.sch** и щелкните ЛКМ по кнопке **Open** для импортирования и открытия схемы, показанной на рис. 26. Скопируйте модель загруженного транзистора (из схемного окна **nonlinear_start**) в схемное окно **IV Curve** (см. рис. 26).

Для расчета семейства ВАХ нелинейного элемента сделайте следующее.

1. В списке элементов найдите и дважды нажмите ЛКМ на **Mease-Devices**. Затем выполните один щелчок ЛКМ по появившемуся ниже элементу **IV**, чтобы увидеть модели измерителей в нижней панели.

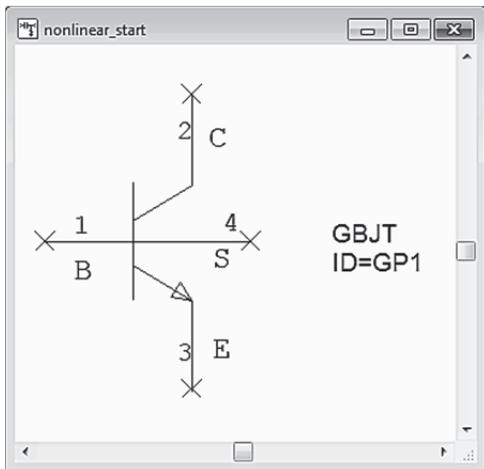


Рис. 26. Модель транзистора

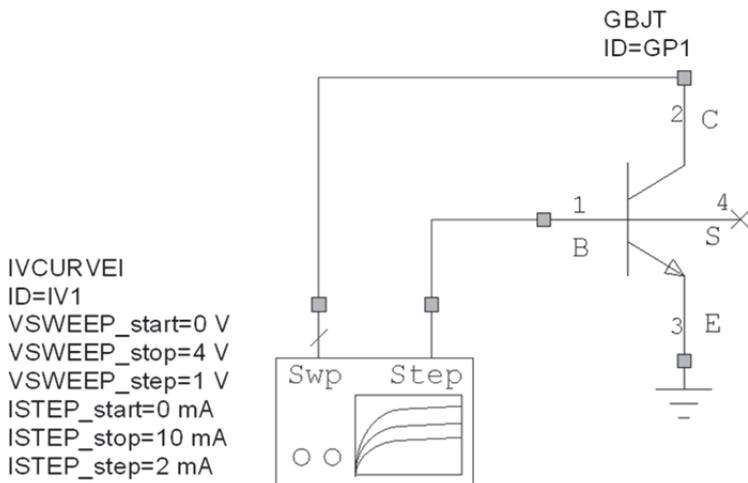


Рис. 27. Модель транзистора и измеритель ВАХ

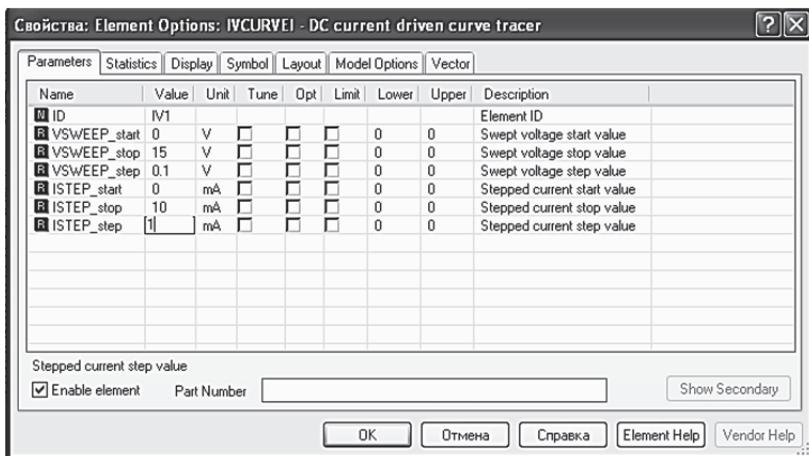


Рис. 28. Окно установки параметров элемента расчета ВАХ

2. ЛКМ щелкните на модель **IVCURVE1** и, удерживая кнопку мыши, перетащите ее в окно схемы. Соедините выводы прибора для измерения ВАХ и модель транзистора, как показано на рис. 27.

3. Подключите к эмиттеру транзистора землю (см. рис. 27).

4. Для спецификации установок измерителя **IV** дважды щелкните по нему ЛКМ. Появится диалог установок его параметров. Установите пределы изменения напряжений и токов на выводах транзистора в соответствии с рис. 28 и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

4.1. Расчет ВАХ

Для расчета ВАХ надо добавить график и вывести на график характеристику **IV**.

1. Откройте закладку **Project**, щелкните ПКМ на элемент **Graph** и выберите ЛКМ **New Graph...** Появится диалоговое окно **New Graph**, в котором напечатайте имя графика «**IV BJT**», выберите **Rectangle** как тип графика и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**. Появится окно графика.

2. ПКМ щелкните по элементу **IV BJT** в дереве проекта и выберите ЛКМ команду **Add Measurement...** Появится диалог характеристик (рис. 29).

3. Выберите **Nonlinear Current** в разделе **Measurement Type** и **IVCurve** в **Measurement**. Имя данных в оконце **Data Source Name** должно быть **IV Curve**. В заключение выполните щелчки ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

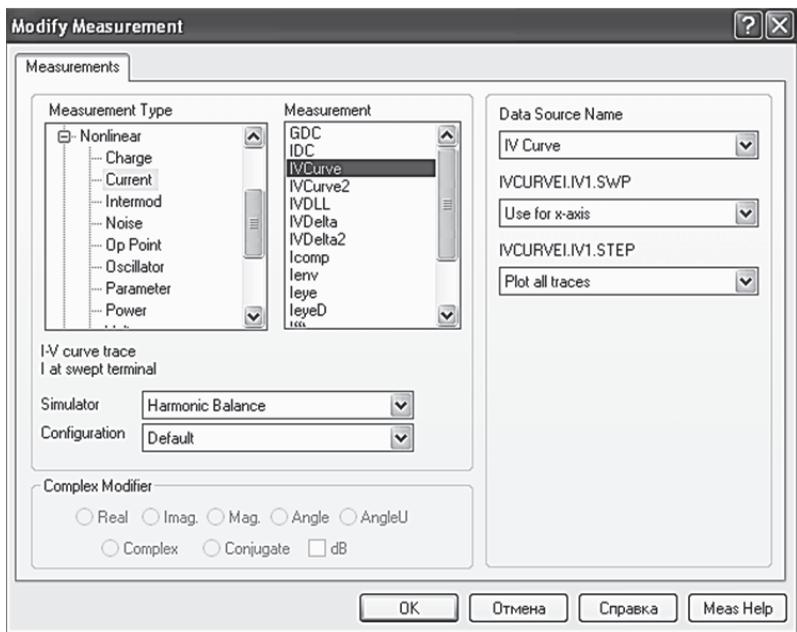


Рис. 29. Окно диалога характеристик

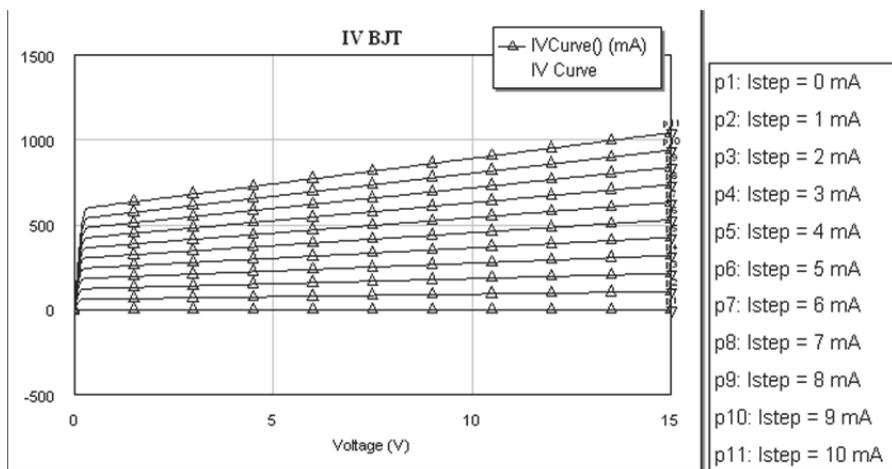


Рис. 30. Семейство выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора

4. Выберите **Simulate > Analyze**. Рассчитанные характеристики будут выведены на график в виде семейства вольт-амперных характеристик, как показано на рис. 30.

Если заменить модель транзистора на упомянутую ранее, то вид ВАХ изменится (сделать самостоятельно).

4.2. Создание схемы смещения

1. Выберите **Project > Add Schematic > New Schematic...** В открывшемся окне напечатайте «**DC Bias**» и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

2. Из схемного окна **nonlinear_start** (или **IV Curve**) скопируйте модель транзистора в окно **DC Bias**.

3. Из подпункта **Inductor** пункта **Lumped Elements** перенесите в окно схемы индуктивность, как показано на рис. 31. Аналогичным

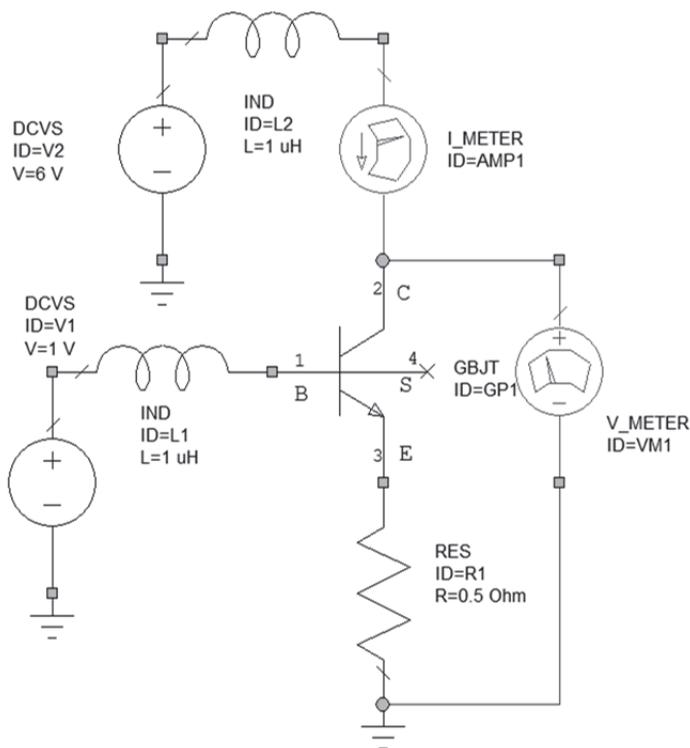


Рис. 31. Схема расчета ВАХ

образом перенесите и резистор. Из подпункта **DC** пункта **Sources** перенесите в окно схемы два источника напряжения типа **DCVS**. Двойным щелчком ЛКМ по пункту **MeasDevice** откройте его и из нижнего окна вкладки **Elements** перенесите в окно схемы вольтметр типа **V_METER** и амперметр **I_METER**. Соберите схему и установите значения параметров элементов в соответствии с рис. 31.

4.3. Добавление рассчитываемых характеристик

1. Нажмите ПКМ на пункт **Graphs** в закладке **Project** и ЛКМ выберите пункт **New Graph...**. Появится окно **New Graph**. В нем напечатайте имя графика «**DC Bias**» и выберите тип графика «**Tabular**» (Таблица) и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

2. Затем ПКМ щелкните по пункту **DC Bias**, и ЛКМ выберите пункт **Add Measurements...**. Появится диалог выбора характеристик для вывода в таблицу, рис. 32. Выберите в нем **Nonlinear Current**

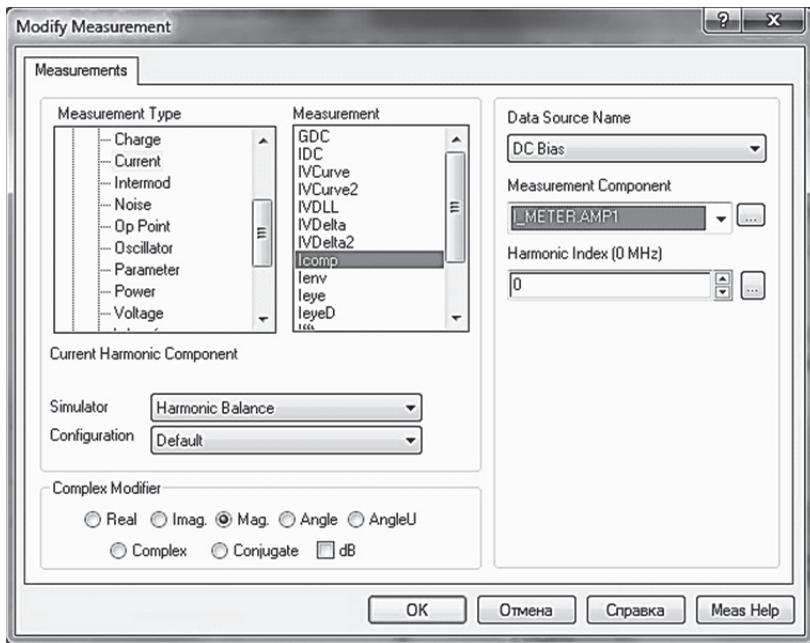


Рис. 32. Диалог выбора расчета и вывода нелинейных характеристик

в блоке **Measurements Type** и выберите **Icomp** в разделе **Measurement**. В списке **Data Source Name** (Имя источника данных) выберите **DC Bias**, а компонентой измерения (**Measurement Component**) выберите **I_METER.AM1**. Установите гармонический индекс **Harmonic Index=0** (постоянный ток), выберите ЛКМ **Complex** в окне **Complex Modifier** и щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

3. Снова ПКМ щелкните по пункту **DC Bias** и ЛКМ выберите пункт **Add Measurements...**. Появится диалог выбора характеристик для вывода в таблицу. Выберите в нем **Nonlinear Voltage** в блоке **Measurements Type** и выберите **Vcomp** в разделе **Measurement**. В списке **Data Source Name** (Имя источника данных) выберите **DC Bias**, а компонентой измерения (**Measurement Component**) выберите **V_METER.VM1**. Установите гармонический индекс **Harmonic Index=0** (постоянный ток), выберите ЛКМ по **Complex** в окне **Complex Modifier** и щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

Frequency (MHz)	Icomp(I_METER.AM... DC Bias Current (Real)	Icomp(I_METER.AM... DC Bias Current (Imag)	Vcomp(V_METER.V... DC Bias Voltage (Real)	Vcomp(V_METER.V... DC Bias Voltage (Imag)
0	295.03	0	6	0

Рис. 33. Результаты расчета смещения

4. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета смещения показаны в таблице, изображенной на рис. 33.

4.4. Добавление портов гармонического баланса

1. Во вкладке **Elements** выберите из папки **Lumped Element** элемент **Capacitor** и установите в окне схемы **DC Bias** три конденсатора, как показано на рис. 34. Выставьте указанные значения параметров элементов.

2. На вход усилителя поставьте порт (типа **PORT1**), работающий в режиме ГБ, из подпункта **Harmonic Balance** пункта **Ports** вкладки **Elements**, а на выход – порт с инструментальной панели.

3. Дважды щелкните ЛКМ по элементу **PORT1** в электронном окне, и в открывшемся окне (рис. 35) установите мощность входного сигнала. В заключение щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

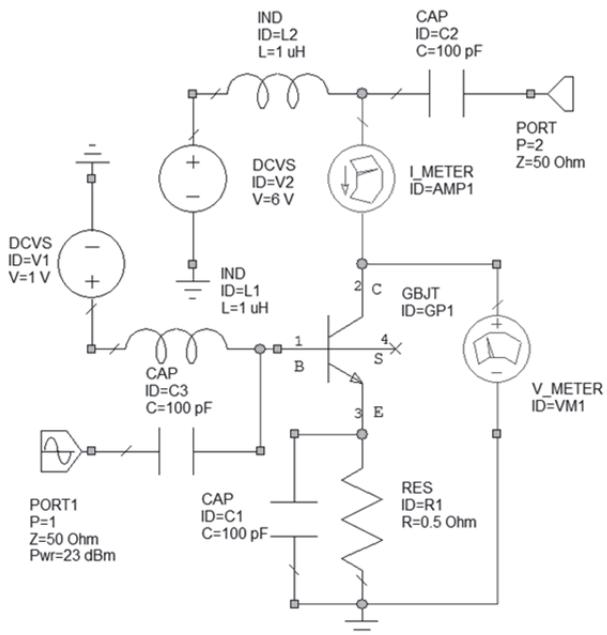


Рис. 34. Окончательная схема усилителя на биполярном транзисторе

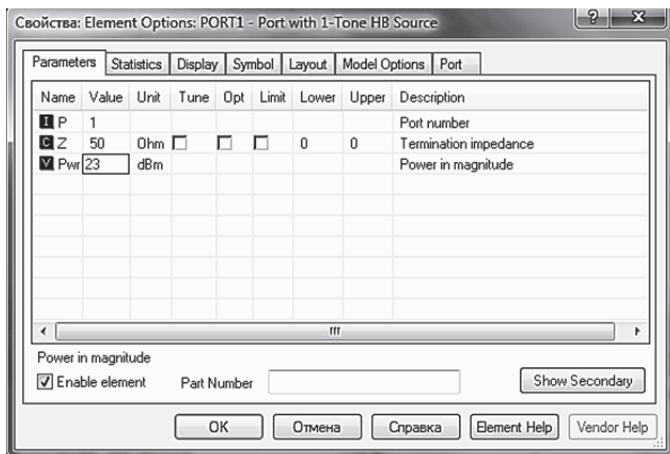


Рис. 35. Установка мощности источника входного сигнала

4.5. Задание частот нелинейного моделирования

Частоты нелинейного анализа могут быть заданы независимо от частот проекта. Для задания нелинейных частот сделайте следующее.

Откройте закладку **Project**, затем щелкните ПКМ по пункту **DC Bias** и ЛКМ выберите пункт **Options...** В закладке **Frequencies** открывшегося окна установите частоты анализа, как показано на рис. 36 (при необходимости уберите флажок слева от записи **Use project defaults**). В заключение щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

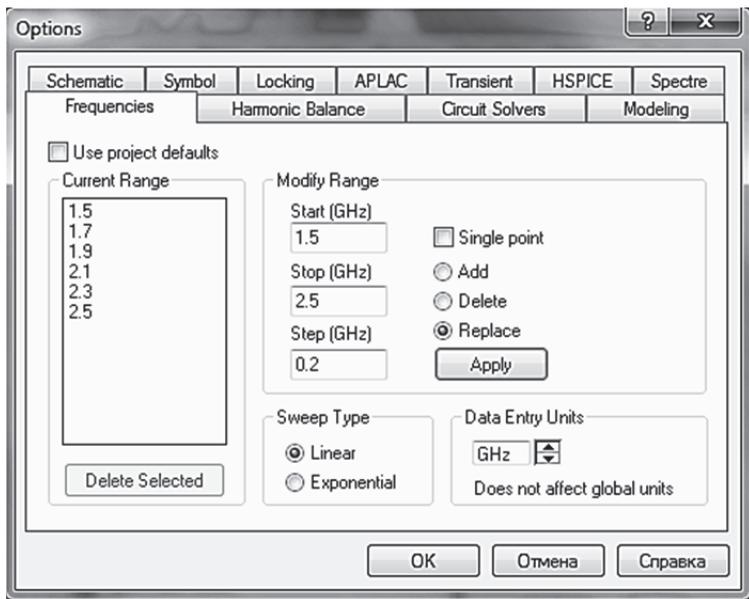


Рис. 36. Задание частот нелинейного анализа

4.6. Расчет характеристик отражения при большом сигнале

Чтобы вывести большесигнальные S-параметры на диаграмму Смита, сделайте следующее.

1. Щелкните ПКМ на пункт **Graph** в дереве проекта, и ЛКМ выберите **New Graph...**

2. Напечатайте **Input Reflection** в оконце **Enter a name for the new Graph**, выберите **Smith Chart** в качестве типа графика и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

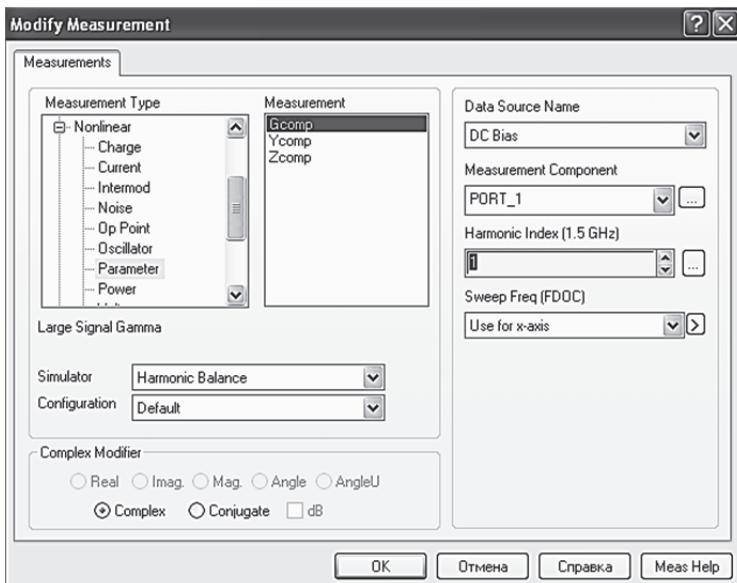


Рис. 37. Окно расчета и вывода нелинейных параметров

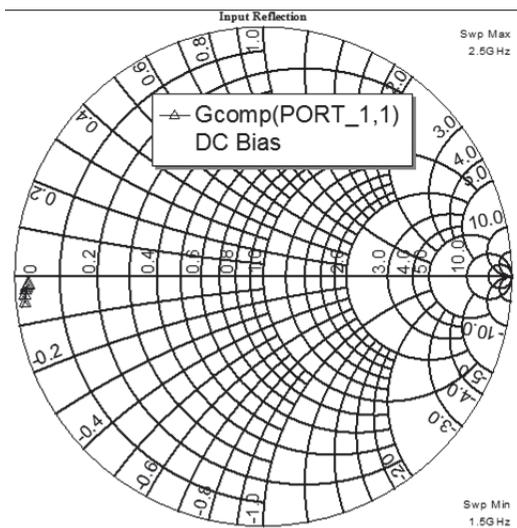


Рис. 38. Вывод на диаграмму Смита коэффициента отражения

3. Чтобы добавить расчет большесигнальных параметров **Gamma**, щелкните ПКМ на пункт **Input Reflection** закладки **Project**, и ЛКМ выберите подпункт **Add Measurement...**, как показано на рис. 37. Установив требуемый вид окна, щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

4. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 38.

4.7. Импорт согласующих цепей

Если входные и выходные согласующие цепи уже предварительно созданы, то их можно импортировать. Для этого сделайте следующее.

1. Откройте закладку **Project**.

2. Щелкните ПКМ по пункту **Circuit Schemstics**, и ЛКМ выберите подпункт **Import Schematic...**. Откроется диалоговое окно **Browse For File** (рис. 39) и с его помощью следует в папке **Examples** пакета **AWR** стандартным для **Windows** образом найти и загрузить файл **input_match.sch** (аналогично тому, как загружался ранее файл **nonlinear_start.sch**). Таким образом, выбирается уже имеющаяся структура входной согласующей цепи (рис. 40) и она включается в проект.

3. Аналогично сказанному выше в том же месте найдите, откройте и включите в проект выходную согласующую цепь (рис. 41).

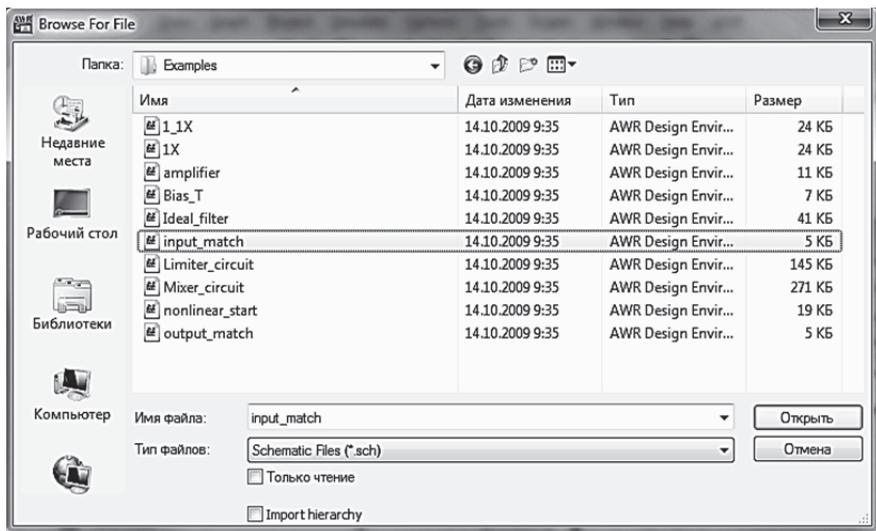


Рис. 39. Окно **Browse For File**

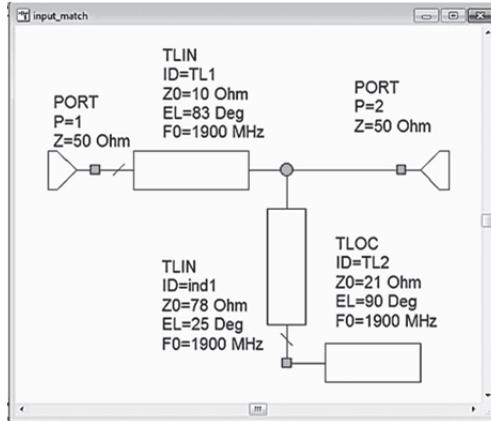


Рис. 40. Схема входной согласующей цепи

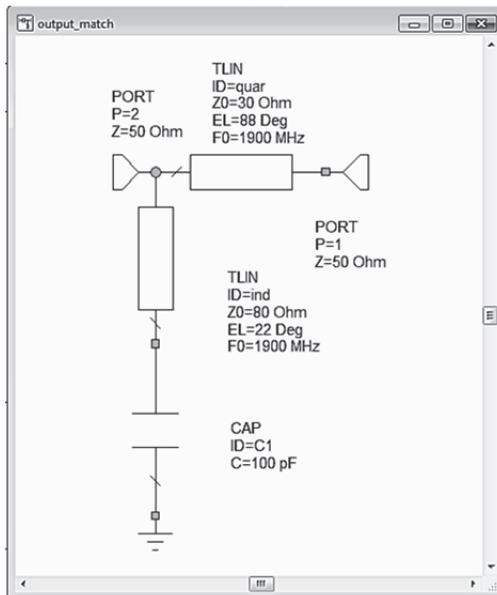


Рис. 41. Схема выходной согласующей цепи

4. Добавление подсхем в схему усилителя. Все составляющие, включая схему входной и выходной согласующей цепи, находятся теперь в пункте **Subcircuits** закладки **Elements**. Их можно теперь стан-

дартным для **AWR** способом перемещать в окно схем, используя вкладку **Elements**.

5. Подготовьте предварительно место в окне схем, а затем перетащите туда согласующие цепи (**input_match** и **output_match**). Двойным щелчком ЛКМ по элементу **PORT1** в схемном окне **DC Bias** откройте диалоговое окно и измените мощность источника сигнала с 23 на 18 **dBm** (щёлкнув в заключении ЛКМ по кнопке **OK**). При этом последнюю цепь следует перевернуть командой **Flip**. В итоге схема должна принять вид, показанный на рис. 42.

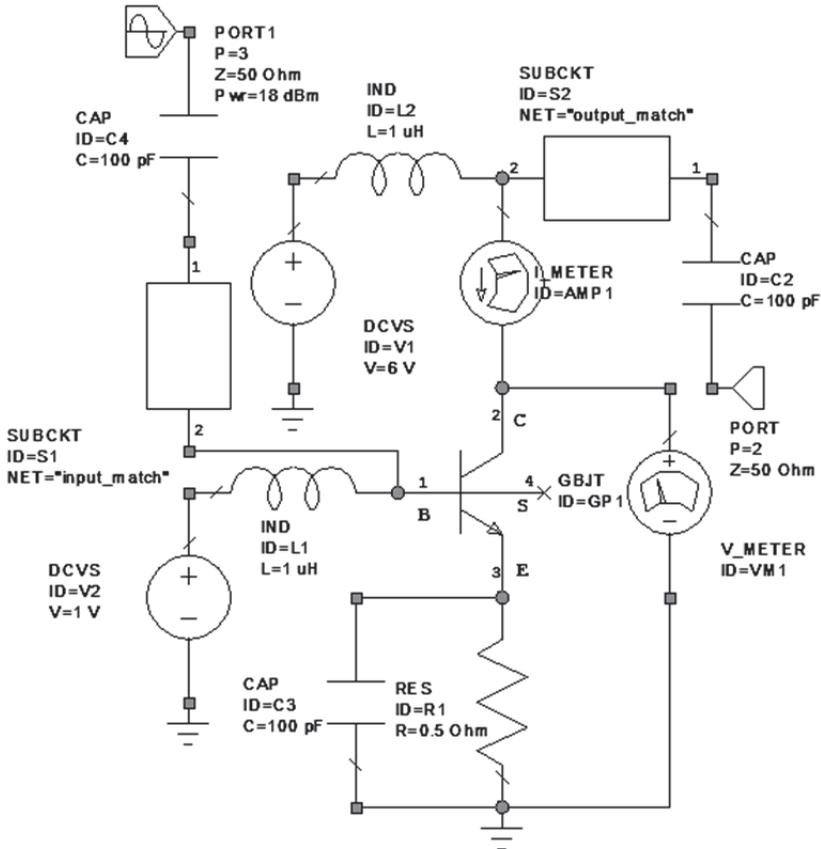


Рис. 42. Схема усилителя с включенными подсхемами входной и выходной согласующей цепи

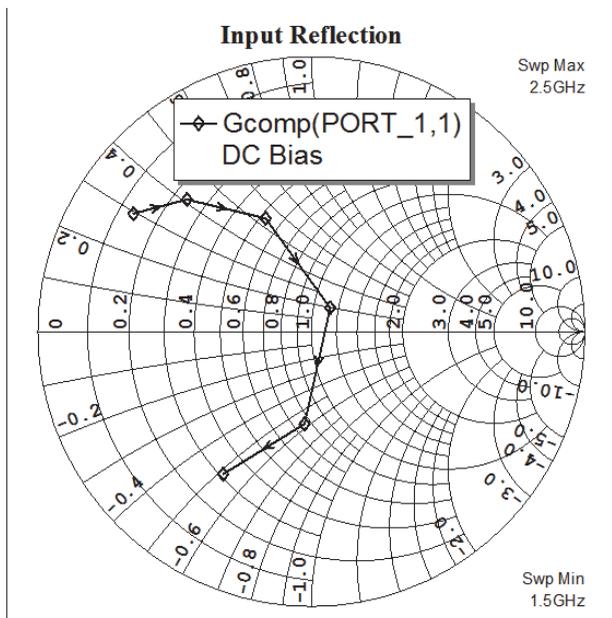


Рис. 43. Зависимость большесигнального коэффициента отражения по входу

6. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 43.

4.8. Расчет выходной мощности в частотном диапазоне

1. На вкладке **Project** щелкните ПКМ на пункт **Graphs**, и ЛКМ выберите **New Graph...**

2. Напечатайте «**Pout**» в оконце **Enter a name for the new Graph**, выберите **Rectangular** в качестве типа графика и щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

3. Далее щелкните ПКМ на подпункт **Pout**, и ЛКМ выберите элемент **Add Measurement...**

4. Выберите **Nonlinear Power** как тип характеристики **Measurement Type** и выберите **Pcomp** как **Measurement**. Выберите схему **DC Bias** как источник рассчитанных данных (**Data Source Name**), выберите **PORT_2** для компоненты измерения **Measurement Component** (рис. 44),

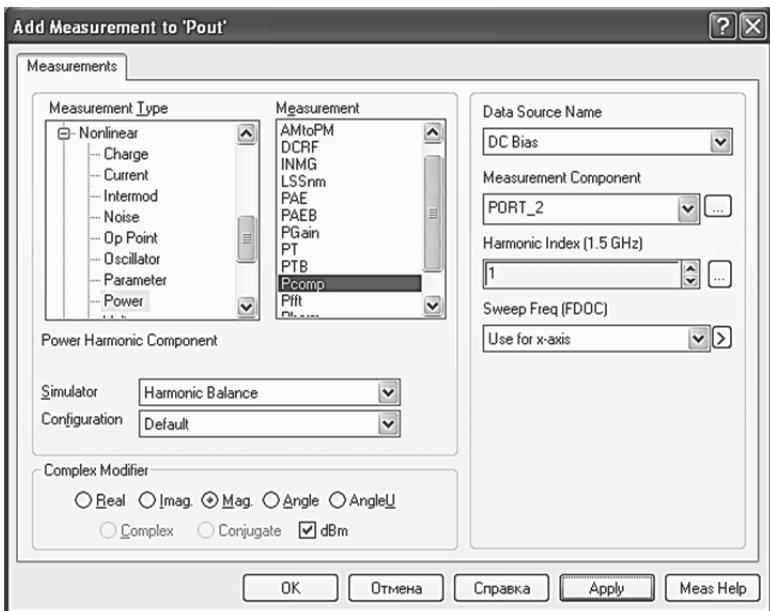


Рис. 44. Окно расчета и вывода параметров нелинейной мощности

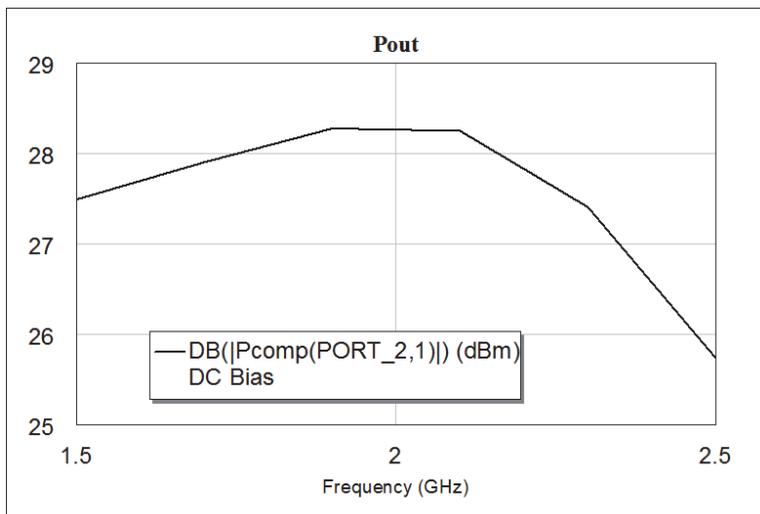


Рис. 45. Рассчитанная зависимость выходной мощности от частоты

установите **Harmonic Index = 1**, а также отметьте галочкой в нижнем окошечке **dBm**. В заключение щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

5. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 45.

4.9. Построение динамической нагрузочной линии

Динамическая нагрузочная линия как большесигнальная характеристика наносится на семейство выходных ВАХ. Для расчета динамической нагрузочной линии выполните следующее.

1. Если необходимо, щелкните ЛКМ по «+» рядом с пунктом **Graphs** на вкладке **Project**.

2. ЛКМ щелкните по пункту **IV BJT**, и ЛКМ выберите **Add Measurement...** В открывшемся окне **Measurements** выберите **Nonlinear Current** как тип **Measurement Type**, а также **IVDLL** как тип характеристики (**Measurement**). Выберите **DC Bias** как **Data Source Name**, и двойным щелчком ЛКМ **GBJT.GP1@2** (после щелчка ЛКМ по кнопке **...**) для **Voltage Measure Component**, **GBJT.GP1@2** как **Current Measure Component** и **Freq = 1.5 GHz** для **Sweep Freq(FDOC)**, как показано на рис. 46. В заключение выполните щелчки ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

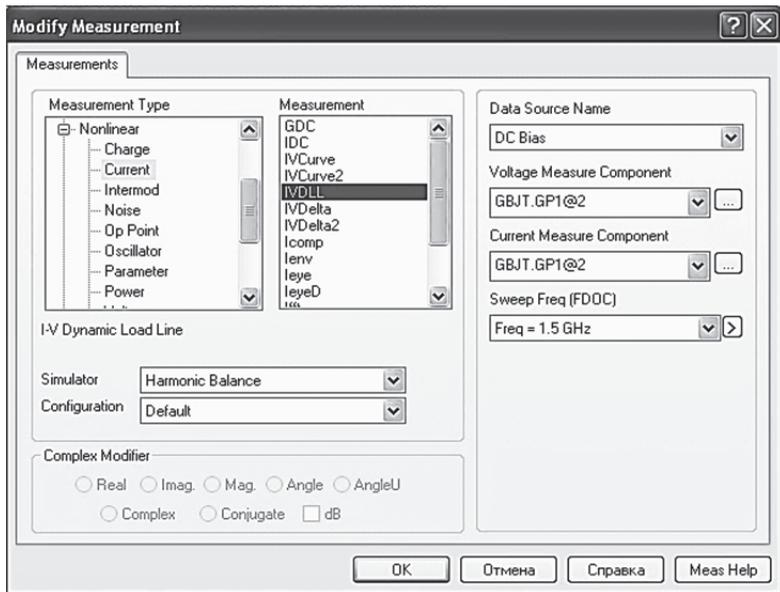


Рис. 46. Включение расчета динамической нагрузочной линии

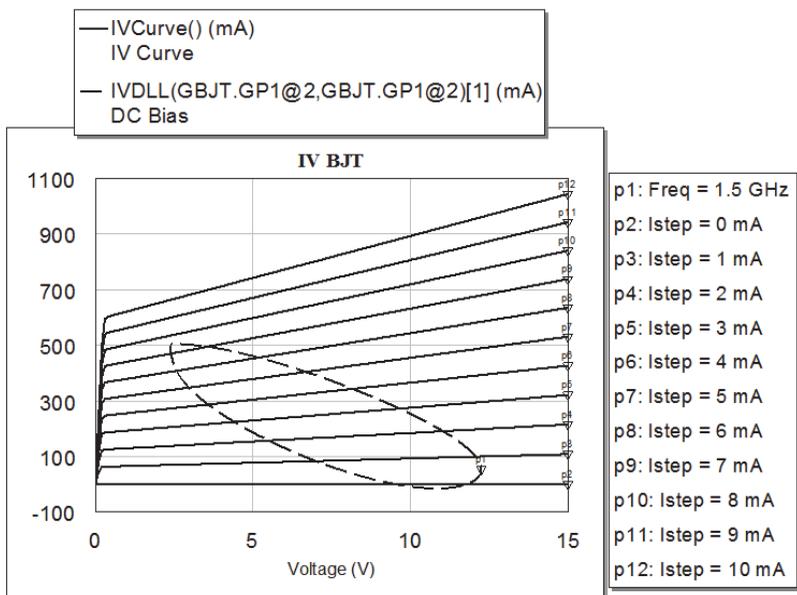


Рис. 47. Рассчитанные выходные ВАХ с нагрузочной линией

3. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 47.

4.10. Добавление порта с двумя гармоническими сигналами

Чтобы рассчитать в схеме нелинейного усилителя такие характеристики, как уровень интермодуляционных искажений третьего порядка, точку пересечения, необходимо выполнить двухтоновый гармонический баланс. Для этого сделайте следующее.

1. Скопируйте схему **DC Bias** в новое окно и дайте копии имя «**Two Tone Amp**».

2. В окне схемы **Two Tone Amp** дважды щелкните ЛКМ по элементу **PORT1**. Появится диалоговое окно входного источника, которое откройте на вкладке **Port** (рис. 48). Выберите в оконце **Tone type** режим **Tone 1 & 2**. Установите флажок возле записи **Swept power**.

3. Откройте вкладку **Parameters** и измените значения столбца **Value** на величины, указанные на рис. 49, а затем щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

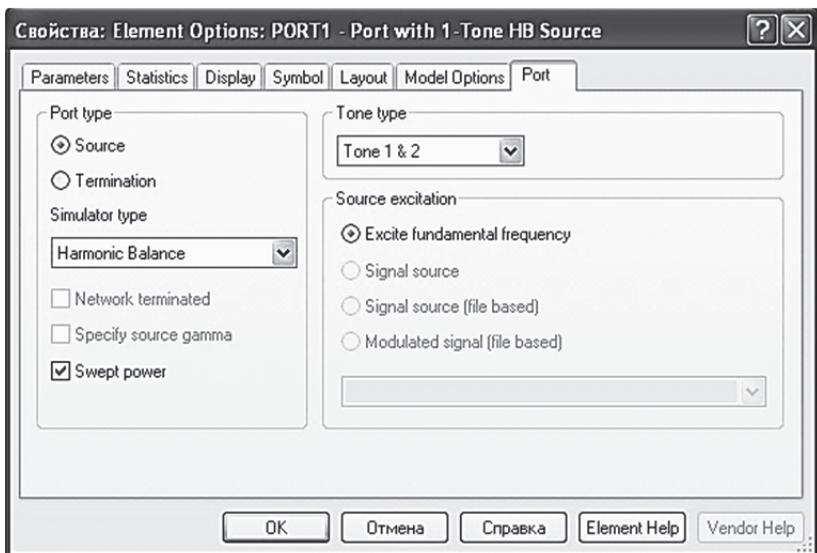


Рис. 48. Окно диалога установки параметров порта на входе схемы

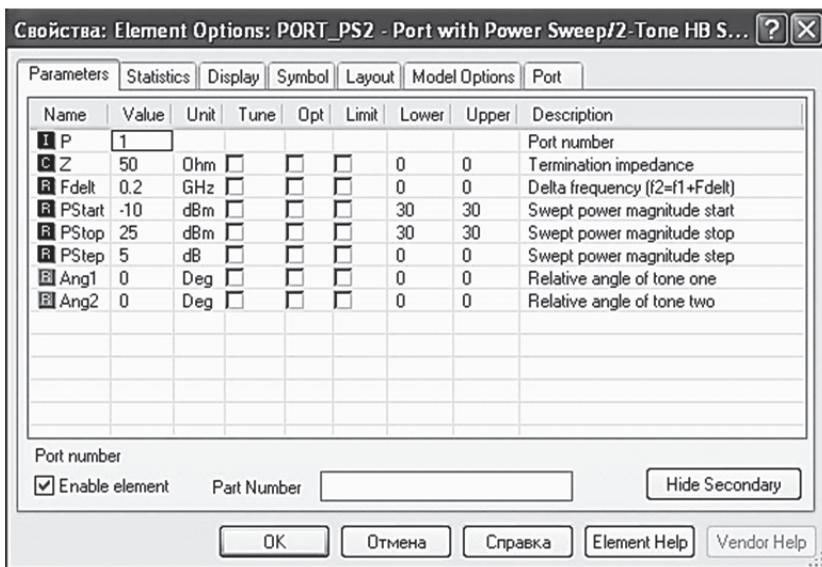


Рис. 49. Установка параметров входного генератора

4.11. Расчет интермодуляционных искажений третьего порядка

1. Добавьте новый график в дереве проекта, щелкнув ПКМ по пункту **Graphs** и выбрав ЛКМ пункт **New Graph...**. Напечатайте имя графика **IM3** в оконце **Enter a name for new Graph**, выберите **Rectangle** как тип графика и в заключение щелкните ЛКМ по кнопке **OK**.

2. Щелкните ПКМ по появившемуся подпункту **IM3** в дереве проекта, и ЛКМ выберите **Add Measurement...**. Появится окно диалога выбора характеристик (рис. 50).

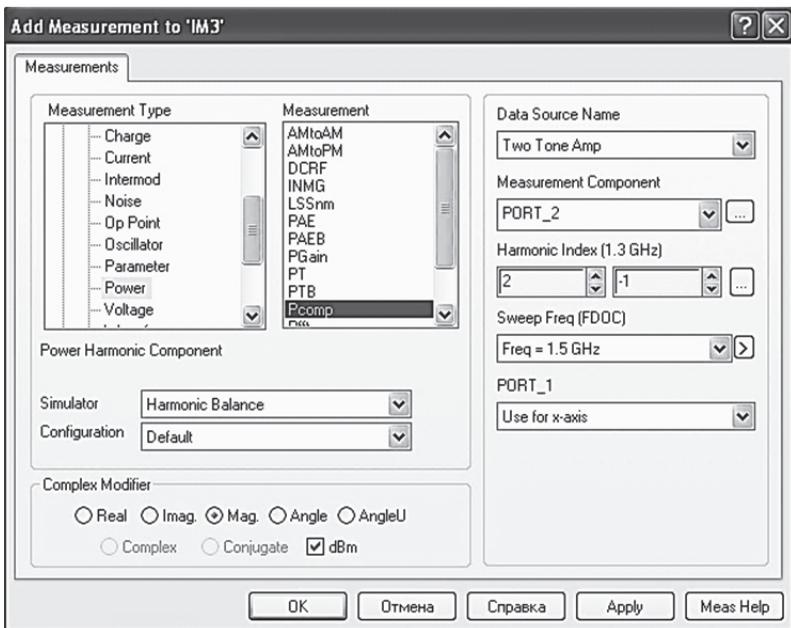


Рис. 50. Окно диалога вывода интермодуляционных искажений

3. В открывшемся окне **Measurements** выберите **Nonlinear Power** как тип **Measurement Type**, а также **Pcomp** как тип характеристики (**Measurement**). Выберите **Two Tone Amp** как **Data Source Name** и **PORT_2** для **Measure Component**, 2 и -1 для **Harmonic Index**, **Freq = 1.5 GHz** для **Sweep Freq(FDOC)** и **Use for x-axis** – для оконца **PORT_1**, как показано на рис. 50. Установите флажок левее записи **dBm**. В заключение выполните щелчки ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.

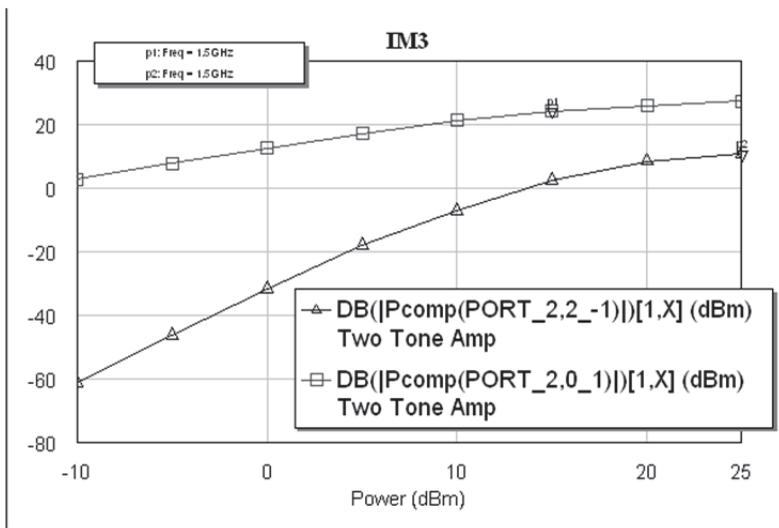


Рис. 51. Зависимость мощности основной гармоники и мощности интермодуляционного продукта третьего порядка от мощности входного генератора

4. Повторите действия пп. 2 и 3 настоящего перечня, выбрав значения «0» и «1» под **Harmonic Index**.
5. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 51.

4.12. Расчет зависимости точки пересечения третьего порядка IP3 от напряжения источника постоянного напряжения

1. Для расчета параметра **IP3** создадим новую электронную схему, назовем ее **IP3** и скопируем туда схему **Two Tone Amp** стандартным для **AWR** способом.
2. Выполним двойной щелчок ЛКМ по входному порту **PORT_PS2** схемы **IP3**. В окне диалогового окна **Element Options** выберите ЛКМ вкладку **Port** и снимите галочку слева от записи **Swept power**, а затем щелкните по кнопке **OK**. В результате этого имя порта изменится на **PORT2 P=1**.
3. Двойными щелчками ЛКМ по записям **Pwr1** и **Pwr2** элемента **PORT2 P=1** измените значение обоих на «-10».

Для задания переменного параметра выполните следующее.

1. Щелкните ЛКМ **Draw > Add Equation** или можно щелкнуть по кнопке  на панели инструментов.
2. Переместите курсор в схемное окно, поместите его выше схемы и щелкните ЛКМ. Произойдет позиционирование курсора.
3. Напечатайте «**Vcc=1**» в окошечке редактора и щелкните ЛКМ за его пределами. Переменная с именем «**Vcc**» создана.
4. В закладке **Elements** щелкните ЛКМ по пункту **Simulation Control**, после чего переместите элемент **SWPVAR** в схемное окно и расположите его, как показано на рис. 52.

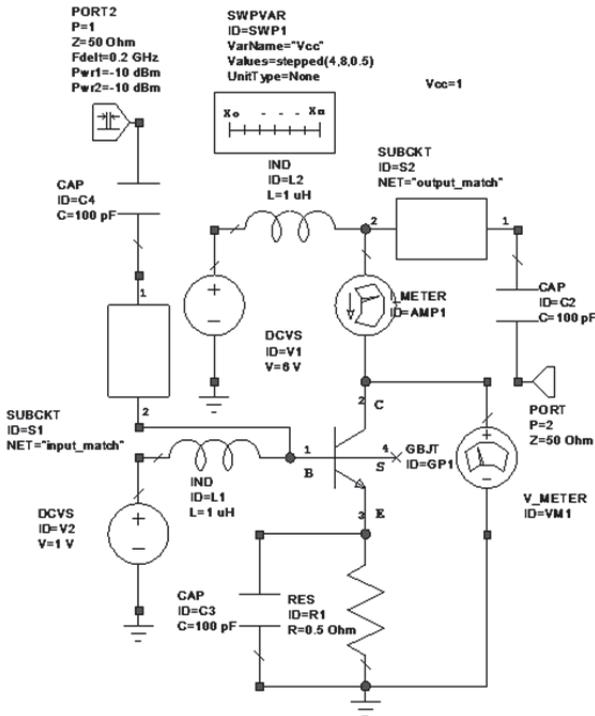


Рис. 52. Схема транзисторного усилителя

5. Двойным щелчком ЛКМ по элементу **SWPVAR** откройте окно **Element Options** и задайте его параметры, определив **Vcc** как переменную, изменяющуюся между величинами 4 и 8 с шагом 0.5 (рис. 53), а затем щелкните ЛКМ по кнопке **ОК**.

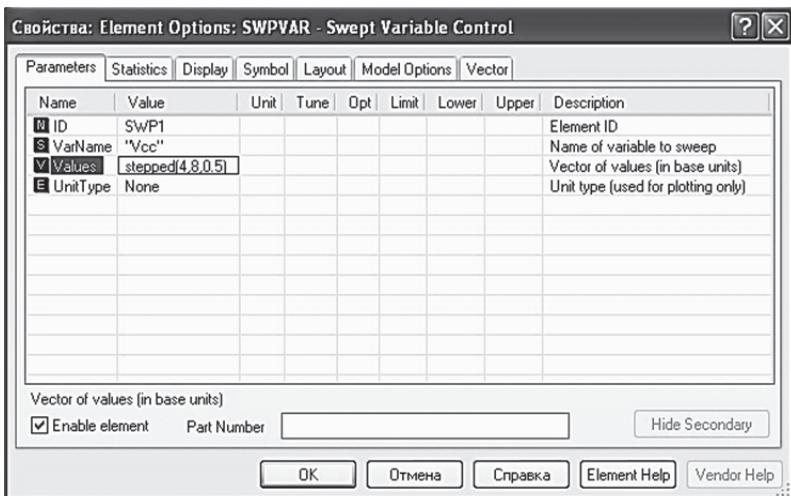


Рис. 53. Окно **Element Options: SWPVAR**

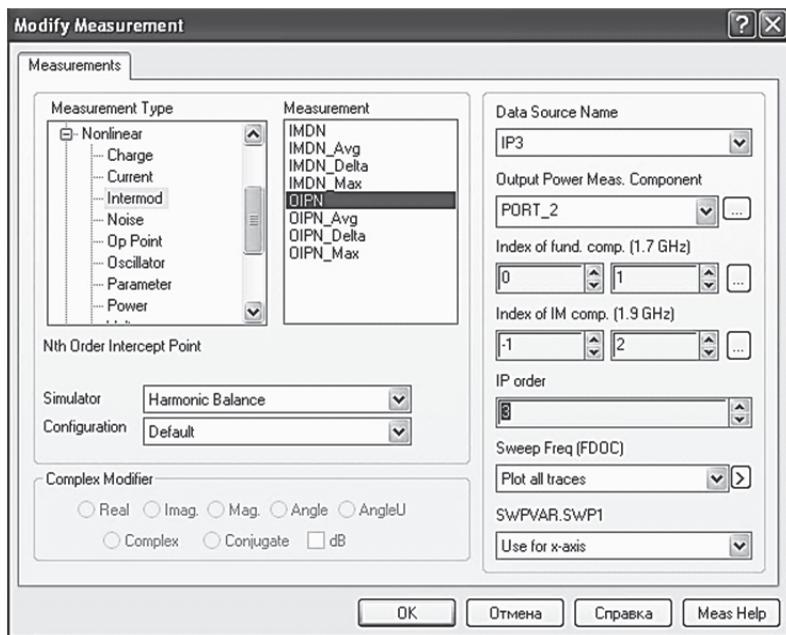


Рис. 54. Окно диалога расчета и вывода зависимости **IP3**

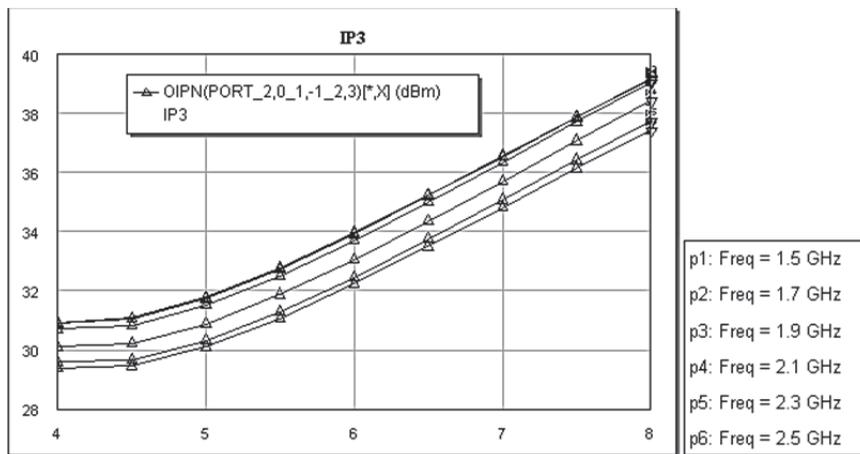


Рис. 55. Зависимость точки пересечения третьего порядка от напряжения на коллекторе транзистора

6. Двойным щелчком ЛКМ по значению параметра V (на рис. 52 оно равно 6) источника напряжения **DCVS V2** выделите его, а затем измените на «**Vcc**».

Для добавления графика и измерений выполните следующее.

1. Добавьте стандартным для **AWR** способом график с именем «**IP3**».
2. Создайте измерение, используя установки, показанные на рис. 54, затем щелкните ЛКМ по кнопкам **Apply** и **OK**.
3. Выберите **Simulate > Analyze**. Результаты расчета показаны на рис. 55.

4.13. Практические замечания

1. Программы, использующие метод ГБ, не являются универсальными и не могут рассчитывать любые нелинейные устройства. Они больше всего подходят для анализа потерь преобразования смесителя и анализа усилителя мощности с одним сигналом на входе. Однако они имеют плохую сходимость при расчете смесителей и мощных усилителей. Этот метод хорошо сходится при расчете уровней интермодуляционных искажений в малосигнальных усилителях, но модели усилительных приборов обычно неточны, поэтому абсолютное значение этого уровня может быть неточное.

2. Модель нелинейного прибора и модели компонентов схемы должны быть справедливы на постоянном токе, основной гармонике и на всех гармониках.

3. Не рассчитывайте большое количество гармоник, чем необходимо. Четыре или пять гармоник – обычно достаточно для схем с FET (полевой транзистор), если они не входят в резкое насыщение; диодные цепи из-за их более сильных нелинейностей могут потребовать восемь гармоник.

4. Начинайте моделирование с простого случая. Используйте сначала только идеальные элементы, не учитывайте цепи смещения. Когда имеется базовый проект, дающий начальные расчеты, начинайте по одному заменять в нем идеализированные элементы реальными.

5. Точность метода ГБ обычно приемлема только для основных частот. Для более высоких гармоник точность ухудшается. Попытка вычислить уровень пятой гармоники мощного усилителя практически бесполезна.

6. Многие нелинейные явления (особенно интермодуляционные искажения высших порядков, кратные и некратные гармоники) очень чувствительны к параметрам схемы и уровню входного сигнала. Из-за этого неизбежно ухудшается точность. Не ожидайте при анализе смесителя точного расчета, например, ИМИ пятого порядка или старше.

7. Точность метода ГБ недостаточна для анализа ИМИ. Для решения задач анализа ИМИ рекомендуется использовать метод рядов Вольтерра.

Задание для самопроверки

Сформулируйте основные рекомендации по использованию метода ГБ.

5. АНАЛИЗ МЕТОДОМ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА

MWO включает возможность расчета методом рядов Вольтерра уровней гармоник и уровней взаимных модуляций в слабо нелинейных устройствах, типа усилителей, работающих при мощностях ниже точки 1 дБ сжатия. Анализ методом рядов Вольтерра может использоваться, чтобы оптимизировать слабо нелинейные устройства точно и эффективно.

5.1. Основы метода рядов Вольтерра

Анализ методом рядов Вольтерра может быть описан как метод возмущения: изменение напряжения на рабочей частоте принимается как малое возмущение напряжения смещения в каждом узле схемы. Например, проводимость g_d смещенного перехода диода равна

$$g_d = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}}, \quad (1)$$

где V_d – напряжение на зажимах диода; I_d – ток; V_{bias} – напряжение смещения.

Тогда малосигнальный ток ВЧ

$$i_d = v_d g_d = v_d \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}}, \quad (2)$$

где v_d – напряжение малого сигнала. Более полное выражение для ряда Тейлора будет

$$i_d = v_d g_d = v_d \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}} + v_d^2 \left. \frac{d^2 I_d}{2dV_d^2} \right|_{V_d=V_{bias}} + \\ + v_d^3 \left. \frac{d^3 I_d}{6dV_d^3} \right|_{V_d=V_{bias}} + \dots \quad (3)$$

Очевидно, что нелинейные члены v_d^2 и v_d^3 определяют нелинейные искажения тока и появление высших гармоник в случае одnogармонического воздействия и интермодуляционных искажений при полигармоническом входном сигнале. Анализ на основе ряда Вольтерра является рекурсивным методом для вычисления тока, представленного этими уравнениями, непосредственно в частотной области.

В методе рядов Вольтерра нелинейная схема преобразуется в линейную и набор «нелинейных источников тока», рис. 56.

Источники представляют токи второй и более высоких гармоник в элементе. Токи найдены с помощью рекурсивного процесса, и каждый

шаг процесса дает конкретный член в ряде Вольтерра. Эти токи трактуются как возбуждения разных порядков; I_2 – ток второго порядка, I_3 – ток третьего порядка и т. д.

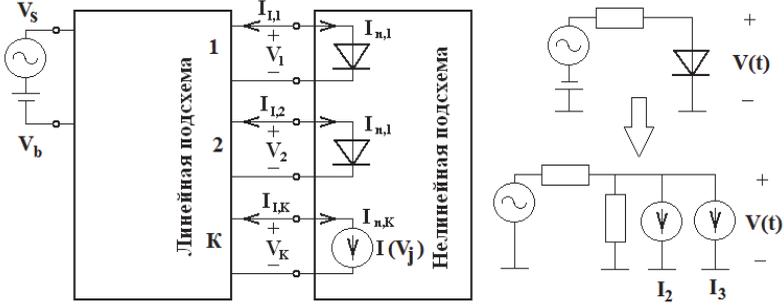


Рис. 56. Эквивалентная схема, поясняющая метод рядов Вольтерра

Эти токи затем трактуются как возбуждения линейной схемы, в результате должен выполняться только линейный схематический анализ! По этой причине анализ методом рядов Вольтерра намного быстрее, чем анализ во временной области или методом ГБ. Кроме того, не используется никакое Фурье-преобразование, так что диапазон чисел ограничен только точностью их представления. Поэтому методом рядов Вольтерра могут быть вычислены очень незначительные продукты ИМИ.

Ряд Тейлора (3) точен только для малых отклонений напряжения вблизи точки смещения. Если сигнал слишком большой, точность падает. Анализ методом рядов Вольтерра полезен только для слабо нелинейных схем или схем, работающих значительно ниже уровней насыщения.

Если резистор имеет нелинейную ВАХ, то аналитически это записывается так:

$$i(v) = v \frac{dI(V)}{dV} \Big|_{V=V_0} + v^2 \frac{d^2 I(V)}{2dV^2} \Big|_{V=V_0} + v^3 \frac{d^3 I(V)}{6dV^3} \Big|_{V=V_0} + \dots, \quad (4)$$

или просто

$$i(v) = a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \dots, \quad (5)$$

где $i(v)$ – малосигнальный ток; v – малосигнальное напряжение; a_i – коэффициенты ряда Тейлора.

Аналогичную запись можно сделать и для нелинейной емкости:

$$q(v) = v \left. \frac{dQ(V)}{dV} \right|_{V=V_0} + v^2 \left. \frac{d^2Q(V)}{2dV^2} \right|_{V=V_0} + v^3 \left. \frac{d^3Q(V)}{6dV^3} \right|_{V=V_0} + \dots, \quad (6)$$

или

$$q(v) = c_1v + c_2v^2 + c_3v^3 + \dots \quad (7)$$

Если в схеме имеется двухчастотное синусоидальное возбуждение

$$v = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_2 \cos(2\pi f_2 t), \quad (8)$$

то, подставив (8) в (4) и выполнив некоторые алгебраические преобразования, находим, что ток $i(v)$ содержит ряд новых частот – продукты взаимодействия между гармониками частот сигнала возбуждения – $f_{m,n} = mf_1 + nf_2$, где $m, n = 0, 1, 2, \dots$. Эти новые частоты называются гармониками и продуктами интермодуляции.

5.2. Использование моделей рядов Вольтерра

MWO включает ряд специальных вольтерровских моделей: источники управляемого тока, нелинейные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. д. Имеется также полная модель полевого транзистора **FET**, диод и модели биполярных транзисторов **BJT**. Они предназначены прежде всего для использования в анализе методом рядов Вольтерра, хотя они могут также использоваться в анализе методом ГБ.

Схемы, использующие только модели для анализа методом рядов Вольтерра, не должны иметь смещение по постоянному току **DC**. Так как коэффициенты ряда Тейлора определены в конкретной точке смещения **DC**, то это смещение подразумевается в модели. Фактически использование смещение **DC** вероятно вызовет ошибочные результаты.

Использование моделей, предназначенных для метода ГБ, может быть реализовано и при использовании анализа методом рядов Вольтерра. Некоторые модели нельзя использовать в методе рядов Вольтерра.

terra. Правило для получения точных малосигнальных результатов **IM** с любой моделью очень просто: чтобы получить точный анализ ИМИ, модель должна точно воспроизвести n -е производные ее ВАХ или ВФХ. Многие из моделей для метода ГБ этого не делают. Например, модели **Curtice**, **Statz** и **SPICE** модели МОП-транзисторов вообще-то не точны. Однако, когда модели должным образом синтезированы и приближены к экспериментальным данным, результирующие модели диода **SPICE** и модели **FET** весьма точны. Рассмотрим некоторые нелинейные модели простых элементов.

VGNL: нелинейный резистор

VGNL – простой нелинейный резистор, ВАХ которого описана рядом Тейлора относительно его напряжения смещения **DC**. Эта модель хорошо работает и в методе рядов Вольтерра, и в малосигнальных вычислениях ИМИ методом ГБ. Вольт-амперная характеристика

$$i(v) = v \left. \frac{dI(V)}{dV} \right|_{V=V_0} + v^2 \left. \frac{d^2 I(V)}{2dV^2} \right|_{V=V_0} + v^3 \left. \frac{d^3 I(V)}{6dV^3} \right|_{V=V_0} + \dots$$

может быть выражена так:

$$i(v) = g_1 v + g_2 v^2 + g_3 v^3 + \dots,$$

где коэффициенты g_i – параметры модели нелинейного резистора.



Параметры g_i определяются для конкретного смещения **DC** и зависят от него. А сама цепь смещения **DC** не включается в схему.

VCNL: нелинейная ёмкость

VCNL – простой нелинейный конденсатор, ВЗХ которого описана рядом Тейлора относительно его напряжения смещения **DC**. Эта модель подходит для использования с вольтерровским анализом или с малосигнальными вычислениями ИМИ методом ГБ. Вольт-зарядная характеристика

$$q(v) = v \frac{dQ(V)}{dV} \Big|_{V=V_0} + v^2 \frac{d^2Q(V)}{2dV^2} \Big|_{V=V_0} + v^3 \frac{d^3Q(V)}{6dV^3} \Big|_{V=V_0} + \dots \setminus$$

может быть выражена так:

$$q(v) = q_1v + q_2v^2 + q_3v^3 + \dots,$$

где коэффициенты q_i – параметры модели нелинейной емкости.



Параметры q_i определяются для конкретного смещения **DC** и зависят от него. Но сама цепь смещения **DC** не включается в схему.

VLNL: нелинейная индуктивность

VLNL – простая нелинейная индуктивность, ТПХ которой описана рядом Тейлора относительно его тока смещения **DC**. Модель подходит для использования с вольтерровским анализом или с малосигнальными вычислениями ИМИ методом ГБ. Зависимость между магнитным потоком и током ТПХ описывается формулой

$$\varphi(i) = i \frac{d\Phi(I)}{dI} \Big|_{I=I_0} + i^2 \frac{d^2\Phi(I)}{2dI^2} \Big|_{I=I_0} + i^3 \frac{d^3\Phi(I)}{6dI^3} \Big|_{I=I_0} + \dots,$$

которая может быть выражена так:

$$\varphi(i) = \varphi_1i + \varphi_2i^2 + \varphi_3i^3 + \dots,$$

где коэффициенты φ_i – параметры модели нелинейной индуктивности.



Параметры φ_i определяются для конкретного смещения **ДС** и зависят от него. Но сама цепь смещения **ДС** не включается в схему.

VVCN: нелинейный источник тока, управляемый напряжением

VVCN – нелинейный источник тока, управляемый напряжением, характеристика ВАХ которого описана рядом Тейлора относительно напряжения смещения **ДС**. Модель подходит для использования и в методе рядов Вольтерра или в вычислениях **ИМ** методом ГБ. ВАХ, описываемая формулой

$$i(v) = v \frac{dI(V)}{dV} \Big|_{V=V_0} + v^2 \frac{d^2 I(V)}{2dV^2} \Big|_{V=V_0} + v^3 \frac{d^3 I(V)}{6dV^3} \Big|_{V=V_0} + \dots,$$

может быть выражена так:

$$i(v) = g_1 v + g_2 v^2 + g_3 v^3 + \dots,$$

где i – ток источника; v – управляющее напряжение. Коэффициенты g_i – параметры модели. Параметры g_i определены для определенного смещения **ДС**. Источник смещения **ДС** не должен быть включен в схему.

Более полное представление о моделях Вольтерра можно получить в [1] или справочной системе **MWO**.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Объясните точностные свойства метода рядов Вольтерра.
2. Запишите аналитические выражения для используемых в методе рядов Вольтерра малосигнальных параметров простейших моделей (нелинейного резистора, емкости, индуктивности, источника тока).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Разевиг В.Д., Потанов Ю.В., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office / под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.: ил.
2. *Унру Н.Э.* Компьютерное моделирование микроволновых устройств: учеб. пособие / Н.Э. Унру. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 160 с.
3. *Maas S.A.* Nonlinear Microwave and RF Circuits. – 2nd ed. – 2003. – 582 p.
4. *Giannini F., Leuzzi G.* Nonlinear Microwave Circuit Design. – 2004. – 392 p.
5. *Богданович Б.М.* Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. – М.: Связь, 1980. – 280 с.
6. *Иванов В.А., Ильницкий Л.Я., Фузик М.И.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Киев: Техника, 1983. – 120 с.
7. *Голубев В.Н.* Эффективная избирательность радиоприемных устройств. – М.: Связь, 1978. – 240 с.
8. Защита от радиопомех / под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.

Приложение

ПЕРЕЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК, РАССЧИТЫВАЕМЫХ В НЕЛИНЕЙНОМ АНАЛИЗЕ

Характеристики нелинейного тока	
IVCURVE	Вольт-амперные характеристики I–V (Расчет ВАХ активных элементов)
IVDLL	Динамическая нагрузочная прямая I–V (Расчет динамической нагрузочной линии на прямоугольную ВАХ)
Icomp	Гармоника тока (частотная развертка), измеряемая амперметром или в порте
Iharm	Гармоника тока в частотной области, измеряемая амперметром или в порте
Itime	Ток во временной области, измеряемый амперметром или в порте
IVDelta	Разность между измеренной и рассчитанной ВАХ
IVDelta2	То же, что и IVDelta , но при ступенчатом изменении тока
IVCurve2	ВАХ при ступенчатом изменении параметра
Характеристики передачи	
Gcomp	Большесигнальный коэффициент отражения (в диапазоне частот)
Ycomp	Большесигнальная полная проводимость (вариация по частоте)
Zcomp	Большесигнальное полное сопротивление (вариация по частоте)
Характеристики нелинейной мощности	
DCRF	Эффективность (КПД) DC по ВЧ (% , вариация частоты)
LSSnm	Большесигнальный S-параметр
PAE	Эффективность по добавляемой мощности (КПД, %, вариация частоты)
PGain	Коэффициент усиления мощности на фундаментальной частоте (вариация частоты)
PT	Общая мощность (вариация частоты)
Pcomp	Мощность гармонической составляющей (вариация частоты)
Pharm	Мощность гармоник в частотной области
Ptime	Мгновенная мощность
Характеристики нелинейных напряжений	
Vcomp	Напряжение гармоника (вариация частоты)
Vharm	Напряжение в частотной области (спектр по напряжению)
Vtime	Напряжение во временной области

ЗАДАНИЕ НА РГЗ

1. Для полевого транзистора (см. номер варианта или согласовать техническое задание с преподавателем) составить электрическую схему (см. рис. 8) и рассчитать: большесигнальный S-параметр (**LSSnm**) как функцию входной мощности и спектр выходного напряжения усилительного каскада. Анализ выполнять для частот и режимов, соответствующих рабочим параметрам конкретного транзистора (см. соответствующий **Product data sheet**). Установить напряжение смещения на входе каскада, соответствующее максимальной величине зависимости **LSSnm**. Сопротивления внешних цепей – 50 Ом. Сравнить полученные характеристики с приведенными в **Product data sheet** параметрами.

Номер варианта	Тип транзистора
1	BLF571
2	BLF871
3	BLF881
4	BLF573
5	BLL6H0514-25
6	BLF6G21-10G
7	BLF6G10LS-135RN
8	BLF6G10-45
9	BLF6G38-10
10	BLF6G38-50

2. Добавьте в схему согласующие цепи на вход и выход транзистора. Здесь можно воспользоваться информацией, имеющейся в **Product data sheet**. Получите основные нелинейные характеристики, приведенные в **Product data sheet**, при необходимости подбирая параметры элементов схемы. Сравните полученные характеристики с приведенными в **Product data sheet**.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список сокращений	4
1. Методы анализа нелинейных схем.....	5
2. Метод гармонического баланса.....	7
2.1. Особенности метода гармонического баланса.....	8
2.1.1. Выбор значимых частот, скорость и сходимость.....	11
2.1.2. Вычисление токов в нелинейных устройствах.....	13
2.1.3. Сходимость.....	15
2.2. Параметры гармонического баланса.....	16
2.3. Установки гармонического баланса.....	21
2.3.1. Задание нелинейных частот	21
2.3.2. Источники.....	22
3. Примеры расчета методом гармонического баланса.....	23
3.1. Анализ усилителя с одиночным тоном.....	23
3.2. Двухтоновый анализ усилителя.....	28
3.3. Трехтоновый анализ смесителя	33
4. Моделирование нелинейных приборов	36
4.1. Расчет ВАХ.....	38
4.2. Создание схемы смещения.....	40
4.3. Добавление рассчитываемых характеристик	41
4.4. Добавление портов гармонического баланса	42

4.5. Задание частот нелинейного моделирования	44
4.6. Расчет характеристик отражения при большом сигнале	44
4.7. Импорт согласующих цепей	46
4.8. Расчет выходной мощности в частотном диапазоне	49
4.9. Построение динамической нагрузочной линии	51
4.10. Добавление порта с двумя гармоническими сигналами	52
4.11. Расчет интермодуляционных искажений третьего порядка	54
4.12. Расчет зависимости точки пересечения третьего порядка IP3 от напряжения источника постоянного напряжения	55
4.13. Практические замечания	58
5. Анализ методом рядов Вольтерра	59
5.1. Основы метода рядов Вольтерра	60
5.2. Использование моделей рядов Вольтерра	62
Библиографический список	66
Приложение. Перечень характеристик, рассчитываемых в нелинейном анализе	67
Задание на РГЗ	68

Уиру Николай Эдуардович

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 16.02.2015. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 4,18. Печ. л. 4,5. Изд. № 293/14. Заказ № 322. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20