

Б. Н. Шелковников*, К. С. Сундучков**,
Г. В. Серджук** Н. В. Кошманова*,
Н. А. Кобинская*, В. Л. Ломака**,
А. А. Микрюков*, О. В. Колчанов*.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ - СХЕМ

Описываются основные возможности пакета прикладных программ "Анализ" и программного комплекса "Спектр". Приводится краткое математическое описание данных прикладных программных средств, их блок-схемы и область применения. Для программного комплекса "Спектр" также приводится алгоритм его работы.

Использование пакета прикладных программ "Анализ" и программного комплекса "Спектр" демонстрируется на примерах проектирования субгармонического смесителя и усилителя мощности на биполярном транзисторе.

"АНАЛИЗ"

"Анализ" является пакетом прикладных программ, ориентированных на моделирование и проектирование пассивных цепей, усилителей, преобразователей частоты. Методы параметризованных S- и Y-матриц включают в себя использование электрических, конструктивных и технологических параметров схемы.

"Анализ" позволяет вычислить большое количество качественных показателей: усиление, потери, отражение, КСВ, коэф-

* 252056, Киев, пр. Победы, 37,
Политехнический институт, 1610, каф. ТОЗ, тел. 441-98-66

** 252136, Киев, пр. 50 лет Октября, 26
НПО "Сатурн", тел. 477-67-39

фициент устойчивости, шум и т. д. С помощью данного пакета можно проводить многовариантный анализ, анализ чувствительности, оптимизацию качественных показателей по параметрам, синтез и оптимизацию фильтров.

"Анализ" состоит из отдельных модулей, реализующих интерпритацию входного языка, диагностику, библиотеку моделей, формирование и решение модельных уравнений, вычисление и оптимизацию параметров. Библиотека моделей элементов состоит из унифицированных базисных элементов, включая модели пассивных элементов, микрополосковых неоднородностей, линеаризованных и параметризованных моделей нелинейных приборов (диодов, ПТБШ)

Блок-схема "Анализа" представлена на рис. 1,

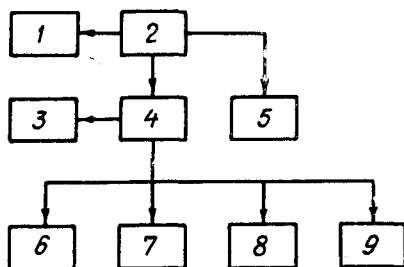


Рис. 1 Блок-схема пакета прикладных программ "Анализ"

- где 1- интерпретатор входных данных;
2- основная программа;
3- библиотека моделей элементов;
4- определение и управление оптимальной последовательностью свертки;
5- программа вычисления качественных показателей;
6, 7, 8, 9- в данных программах реализуется математика, которая будет описана ниже.

Использование матриц во время проектирования линейных схем в частотной области оказывается очень удобным. Наибольшую гибкость имеет смешанное представление (S- и Y - матрица).

Если внутренние и внешние узлы схемы имеют соответственно индексы "i" и "e", то используются следующие уравнения для преобразования матриц к внешним узлам [1]:

$$Y' = Y_{ee} - Y_{ei} * Y_{ii}^{-1} * Y_{ie}, \quad (1)$$

$$S' = S_{ee} - S_{ei} * (S_{ii} - M)^{-1} * S_{ie}, \quad (2)$$

$$Y = Y_0 * (E - S)^{-1} * (E + S) * Y_0, \quad (3)$$

$$S = Y_0^{-1} * (Y_0 - Y) * (Y_0 + Y)^{-1} * Y_0, \quad (4)$$

где Y и S - исходные матрицы:

$$Y = \begin{array}{cc|cc} \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ : Y_{ee} & Y_{ei} : & : S_{ee} & S_{ei} : \\ Y = : & : , & S = : & : ; \\ : Y_{ie} & Y_{ii} : & : S_{ie} & S_{ii} : \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \end{array}$$

Y' и S' - преобразованные матрицы; M - матрица связей полюсов; E - единичная субматрица; Y₀ - диагональная матрица нормирующих проводимостей.

Различные версии данного пакета прикладных программ эксплуатируются на протяжении ряда лет, при этом было разработано большое количество различных схем.

"СПЕКТР"

Программный комплекс "Спектр" был разработан на основе метода нелинейного спектрального анализа (НСА) [2, 3, 4], основанного на применении гармонического баланса и многомерно-го преобразования Фурье.

Уравнения нелинейной цепи в частотной области могут быть представлены (используя потенциальный базис) в виде [3]

$$F = Y(j\omega) * V + \int_{ds} \sum_{k=1}^{m_1} j \omega_k V_k + \int_{ns} \sum_{k=1}^{m_2} I_k - \int_{cv} \sum_{k=1}^{m_3} V_k = 0, \quad (5)$$

где j - мнимая единица; ω - круговая частота; m_1, m_2, m_3 - индексы частот; $\omega = m_1 \omega_1 + m_2 \omega_2 + \dots + m_k \omega_k$ - базис фундаментальных частот;

$Y(j\omega)$ - матрица комплексных проводимостей линейной подсхемы на частоте ω ;

$\sum_{k=1}^{m_1} j \omega_k V_k$, $\sum_{k=1}^{m_2} I_k$, $\sum_{k=1}^{m_3} V_k$ - вектора токов независимых источников, токов нелинейных источников и узловых потенциалов на частоте ω , соответственно; \int_{ds} , \int_{ns} , \int_{cv} - топологические матрицы.

Для решения (5) был применен метод Ньютона, который может быть представлен в виде:

$$V = V_{j-1} - K_j^{-1} * F'_j * F'_j, \quad (6)$$

где V - вектор неизвестных; F'_j - матрица производных; K_j - коэффициент, выбираемый из условий сходимости процесса.

Мы не можем применить (6) непосредственно к (5), так как $F(V)$ является неаналитической функцией ($F'(V)$ не существует).

Поэтому мы разделим V на вещественную $\text{Re}(V)$ и мнимую $\text{Im}(V)$ части, что даст нам возможность оперировать с вещественными переменными вместо комплексных [3, 5, 6]. Модифицированное уравнение может быть решено методом Ньютона. Другая трудность - ограниченная область сходимости метода Ньютона. Необходимо найти такое V (V принадлежит $V, V - dV$), чтобы выпол-

нялось неравенство: $\|F_{j+1}\| < \|F_j\|$. В частности, применение полиномиальной интерполяции позволяет найти решение этой задачи и значительно сократить время вычислений.

Блок-схема "Спектра" представлена на рис. 2,

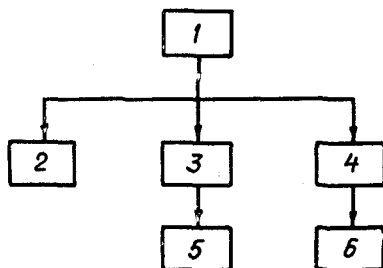


Рис. 2 Блок-схема программного комплекса "Спектр"

где 1 - основная программа; 2 - ряд вспомогательных процедур: интерпретатор входных данных, анализатор описания спектров, процедура разложения схемы, оценка качественных показателей и т. д.; 3, 4 - программы решения линейной и нелинейной подсхемы соответственно; 5, 6 - библиотеки моделей линейных и нелинейных элементов, соответственно.

Алгоритм работы комплекса "Спектр" можно представить в виде.

1. Ввод схемы и описание предполагаемого спектра.
2. Формирование схемы хранения разреженных спектров.
3. Разделение схемы на линейную и нелинейную подсхемы.
4. Формирование и редуцирование модели линейной подсхемы.
5. Формирование и решение нелинейных уравнений на комплексной плоскости:
 - 5.1 вычисление вектора ошибок, используя разложения (шаг 3), матрицы линейной подсхемы (шаг 4), многомерное БГФ, библиотеку моделей нелинейных элементов;
 - 5.2 прекращение проверки. Если условие удовлетворено, то переход на шаг 6;
 - 5.3 вычисление матрицы Якоби;
 - 5.4 вычисление вектора поправок и обновление значений независимых переменных.
6. Восстановление линейно-зависимых переменных схемы.
7. Вычисление качественных показателей.
8. Вывод данных.
9. Конец работы алгоритма.

Преимущество данного алгоритма заключается в его способности находить разложение Фурье в отдельных случаях через явные выражения, в противоположность численным процедурам, и в уменьшении времени вычисления для решения системы уравнений баланса. НСА позволяет определять осциллирующие частоты невынужденных схем, локальную и глобальную стабильность нелинейных схем, проводить оптимизацию.

При помощи программного комплекса "Спектр" были промоделированы усилители, малосигнальные и мощные преобразователи частоты, умножители, ключи, выпрямители, фазовращатели, переключатели, детекторы, генераторы гармоник и другие схемы.

ПРИМЕРЫ

Применение программного обеспечения, описанного выше, будет показано на примерах субгармонического смесителя (рис. 3) и усилителя мощности на биполярном транзисторе (рис. 4)

При проектировании субгармонического смесителя сначала был проведен предварительный расчет цепей подачи СВЧ сигнала, сигнала гетеродина и ПЧ сигнала.

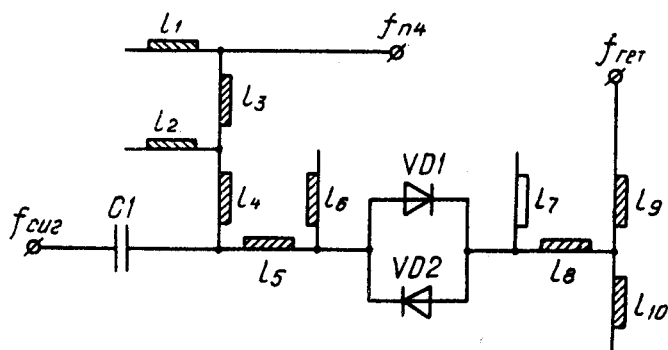


Рис. 3 Субгармонический смеситель

Цепи рассчитывались исходя из условий работоспособности смесителя. Затем был проанализирован смеситель в целом. При этом получены следующие результаты: потери преобразования 7,05 дБ; КСВ сигнала 1,89; КСВ гетеродина 3,47; потери гетеродина 15 дБ. При увеличении мощности гетеродина с 10 до 20 мВт потери возросли на 0,5 дБ. В результате оптимизации на основе анализа результатов расчета удалось уменьшить КСВ гетеродина до 2.

Изготовленный образец имел следующие параметры: потери преобразования 7,5 дБ; КСВ гетеродина ≤ 2 ; КСВ сигнала ≤ 2 в полосе 600 МГц.

Таким образом, можно утверждать, что получено хорошее согласование результатов расчета с экспериментальными данными.

При проектировании усилителя мощности стояла задача получить усиление 10 дБ при $P_{вх} = 0,3-0,4$ Вт, f центр. = 1,06 ГГц, в полосе 7 - 10 % и $U_{пит} = 18$ В. При использовании схемы, изображенной на рис. 4, и ее параметров приведенных там же, были получены следующие результаты: коэффициент передачи в заданной полосе частот по первой гармонике с 9,39 до 9,82 дБ, по второй от -12,24 до -9,11 дБ, по третьей от -40,32 до -28,48 дБ. При этом на центральной частоте были получены следующие значения: модуль входного сопротивления 57 Ом; фаза входного сопротивления - 4,1 град.; модуль коэффициента отражения по входу 0,12; фаза коэффициента отражения по входу - 18 град.; КСВ по входу 1,26.

Модель КТ919Б

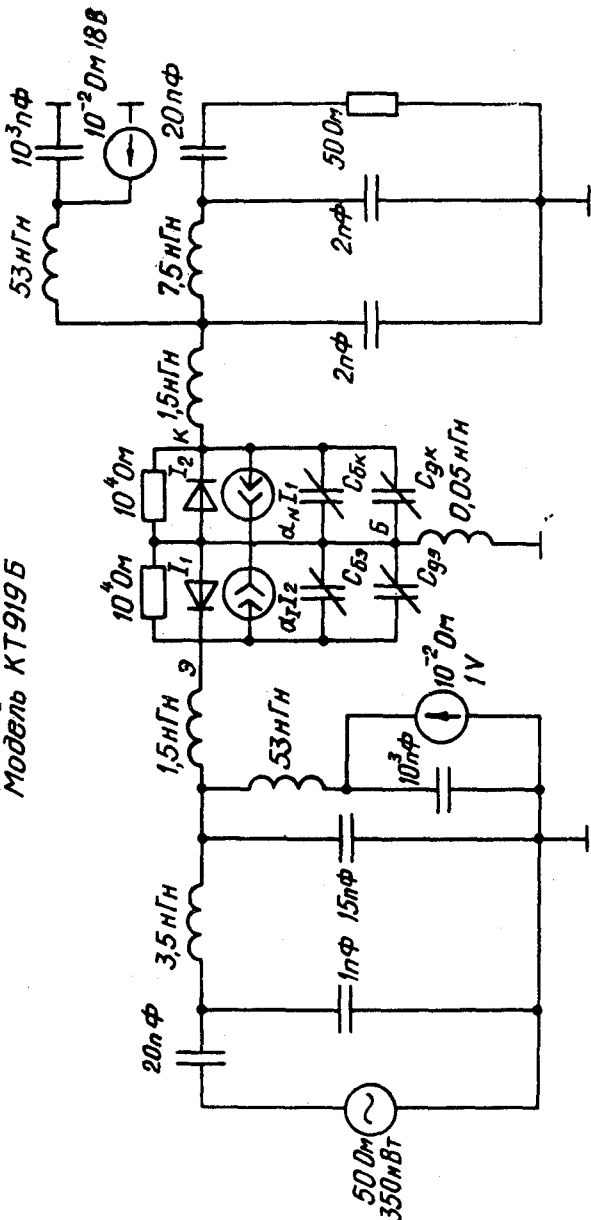


Рис. 4 Усилитель мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В данной статье были представлены два пакета программ, предназначенных для моделирования СВЧ-схем. Первый - "Анализ", предназначен для моделирования и оптимизации фильтров, усилителей, смесителей и т. д. в линейном или параметрическом представлении. Второй - "Спектр", предназначен для моделирования и проектирования нелинейных схем содержащих диоды, ПТЭИ и т. д. при многочастотном возбуждении в частотной/временной области, используя метод гармонического баланса. Оба пакета были выполнены на языке FORTRAN в IBM-совместимой операционной среде. С их помощью было спроектировано большое количество различных схем. Полученные результаты оказались в хорошем согласовании с предсказанными.

Список литературы

1. Гупта К., Гардх Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. -М.: Радио и связь, 1987.
2. Шелковников Б. Н., Сундучков К. С., Мушер Н. В., Костюкевич А. В. Алгоритмы и программы для функционального проектирования СВЧ-систем//Электроника и моделирование, 11, 1976.
3. Хабицкий В. П., Шелковников Б. Н., Спектральный анализ нелинейных схем при двух произвольных источниках мощности//Автоматизированное проектирование в электронике. 1982. №5. -С. 91-100.
4. B. N. Shelkovnikov. Tools and Techniques for Nonlinear Circuit Spectrum Analysis. Abstracts on the 5th International Symposium on Electromagnetic Theory (SEIT' 89), Budapest, Hungary, 1989.
5. V. Rizzòli et al. General-Purpose Harmonic Balance Analysis of Nonlinear Microwave Circuits Under Multitone Excitation. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. -36, No 12. -p 1650-1660, Dec. 1988.
6. M. Gayral et al. The Spectral Balance - a General Method for Analysis of Nonlinear Microwave Circuits Driven by Non-Harmonically Related Generators. 1987 MIT-S Int. Microwave Symp. (Dig.), Las Vegas, Jun pp 119-121, 1987.