

УДК 621.373.14(075.8)

СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

В.Л. Карякин, профессор ПГУТИ, д.т.н., karyakin@psati.ru

Д.В. Карякин, начальник отдела ПГУТИ, к.т.н.

В.Б. Толмачев, зав. лабораторией ПГУТИ

Ключевые слова: телевизионный передатчик, усилитель мощности, согласующие цепи, структурно-параметрический синтез, визуальное моделирование.

Введение. Проблемы согласования высокочастотных систем передачи сигналов относятся к ключевым проблемам радиотехники, телекоммуникационных систем и устройств, систем радио- и телевизионного вещания [1–3]. Актуальность решения задач построения согласующих цепей, удовлетворяющих противоречивым требованиям по качественным показателям, возрастает с освоением новых диапазонов частот, применением широкополосных сигналов цифровых приемопередающих устройств и усложнением электромагнитной обстановки.

Для исследования и синтеза оптимальных широкополосных согласующих цепей по заданному критерию качества применяются как аналитические методы [1–3], так и методы, основанные на использовании инструментальной среды визуального моделирования [4, 5]. Однако задача синтеза многозвенных широкополосных цепей согласования, позволяющего автоматизировать процесс инженерного проектирования с заданными показателями качества [6], до сих пор не решена.

Цель настоящей работы — создание метода структурно-параметрического синтеза широкополосных согласующих цепей по заданной многокритериальной целевой функции для усилителей мощности (УМ) телевизионных радиопередатчиков с использованием инструментальной среды визуального моделирования AWR Microwave Office (AWR MWO).

Для линейных систем передача максимальной мощности достигается, когда активное сопротивление цепи потребителя сигнала (нагрузки) равно активному сопротивлению источника сигнала, а реактивная часть сопротивлений цепей потребителя и источника сигнала противоположна по знаку. В теории комплексных переменных эта связь известна как комплексное сопряжение.

Комплексно-сопряженное число Z^* получается при изменении знака мнимой части числа Z . Таким образом, для линейных систем условие передачи максимальной мощности от источника нагрузки имеет вид:

$$Z_n = Z_n^*$$

где Z_n — комплексное сопротивление нагрузки; Z_n^* — комплексно-сопряженное сопротивление источника сигнала.

При изменении рабочей частоты могут существенно изменяться компоненты активной и мнимой составляющих сопротивления источника сигнала Z_n . Разработка устройства преобразования стандартных сопротивлений нагрузки Z_n , поддерживающего комплексно-сопряженную связь с изменением сопротивления источника сигнала Z_n от частоты,

считается наиболее сложным аспектом широкополосного проектирования.

В усилителях мощности иногда требуется поддержание широкополосного согласования с источником сигнала при условии обеспечения минимальных нелинейных искажений или максимального КПД. Решение этих задач также осуществляется обеспечением *широкополосной комплексно-сопряженной связи с источником сигнала*, но при этом сопротивление источника сигнала для реализации каждого из рассмотренных условий будет отличаться от сопротивления, обеспечивающего максимальную мощность.

Оценка оптимального сопротивления нагрузки источника сигнала. В общем случае УМ радиопередатчиков содержат активный элемент (транзистор), входную и выходную цепи согласования, а также цепи питания и смещения. Входная цепь согласования трансформирует входное сопротивление транзистора в оптимальное сопротивление нагрузки для источника возбуждения, а выходная трансформирует сопротивление нагрузки в требуемое для этого транзистора сопротивление с целью обеспечения оптимального режима работы.

В данной работе приведена методика оценки оптимального сопротивления нагрузки на примере исследования УМ передатчика, предназначенного для работы в IV диапазоне частот 470–582 МГц (21–...34-й телевизионные каналы) наземного ТВ-вещания [5]. Критерий оптимизации — минимум нелинейных искажений УМ на полевом транзисторе MW6S010N, работающем в режиме класса А.

Алгоритм программы оценки оптимального сопротивления нагрузки УМ для обеспечения минимальных нелинейных искажений следующий:

A1 Ввод исходных данных.

Ввод компьютерной модели транзистора, а также минимальной (f_{\min}), максимальной (f_{\max}) и средней (f_{cp}) частоты из заданного диапазона рабочих частот УМ.

A2 Составление компьютерной модели УМ с учетом ограничений по напряжению питания, смещению, мощности возбуждения и виду цепей питания.

A3 Установка рабочей частоты УМ.

A4 Установка в цепь сопротивления нагрузки УМ измерительного тюнера *Ltuner*.

A5 Установка нулевых начальных параметров (модуль, фаза) тюнера.

A6 Установка параметров измеряемых нелинейных искажений и вывод результатов измерений на график.

A7 Открытие инструмента *Load Pull* для оценки сопротивления нагрузки, соответствующего минимальным нелинейным искажениям при заданной рабочей частоте.

A8 Установка параметров измерений сопротивления нагрузки.

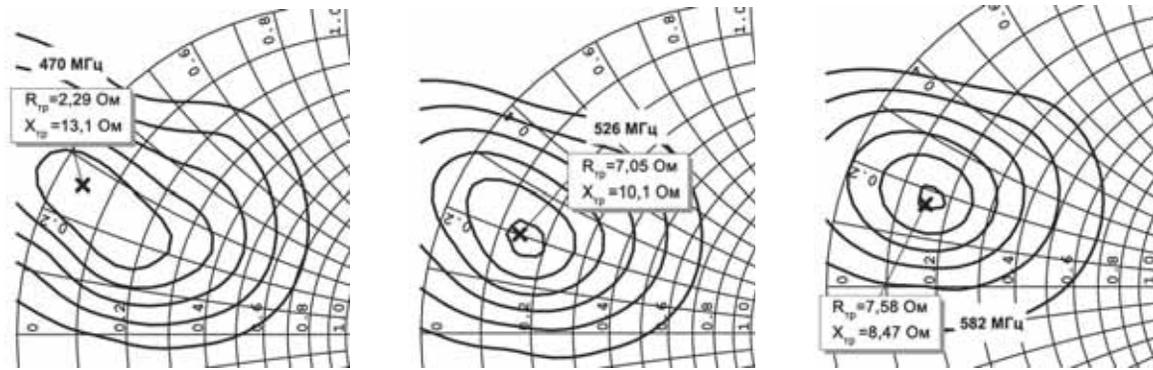


Рис. 1

A9 Оценка сопротивлений нагрузки, соответствующих различным уровням нелинейных искажений.

A10 Нанесение на диаграмму Смита семейства зависимостей сопротивления нагрузки, соответствующих различным уровням нелинейных искажений для заданной рабочей частоты (470–582 МГц) (рис. 1).

A11 Нанесение на диаграмму Смита оптимального сопротивления нагрузки, соответствующего минимальным нелинейным искажениям для заданной рабочей частоты (см. рис. 1).

A12 Анализ полученных результатов. Если расчеты проведены не для всех заданных рабочих частот ($f_{мин}$, $f_{макс}$ и $f_{ср}$), идти к А3.

A13 Анализ уровня нелинейных искажений в диапазоне рабочих частот при сопротивлении нагрузки, соответствующем оптимальному значению для средней частоты.

Значения коэффициента нелинейных искажений (КНИ) транзистора MW6S010N в диапазоне рабочих частот при сопротивлении нагрузки $R_{тр} = 7,05$ Ом и $X_{тр} = 10,1$ Ом приведены в таблице.

f , МГц	470	498	526	554	582
КНИ, дБ	-74,3	-78,5	-84,1	-83,8	-79,2

Из таблицы следует, что при данной нагрузке транзистора нелинейные искажения усилителя мощности в диапазоне частот не превышают 74,3 дБ.

При неудовлетворительных результатах анализа уровня нелинейных искажений идти к А2.

A14 Составление схемы УМ с оптимальным сопротивлением нагрузки для средней частоты.

В результате в соответствии с А1–А14 создана программа оценки оптимального сопротивления нагрузки УМ.

Оптимизация широкополосных согласующих цепей. Воспользуемся диаграммой Смита [5] инструментальной среды визуального моделирования AWR MWO. Построения траекторий трансформации сопротивлений удобно проводить на диаграмме иммитансов (Impedance), объединяющей возможности отображения на одном графике полных сопротивлений – импедансов (Impedance) и проводимостей – адмиттансов (Admittance). При этом важно учитывать влияние фактора качества – добротности Q , являющейся неотъемлемой частью ширины полосы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебательных систем. Величина нагруженной добротности – это отношение реактивного и активного сопротивлений в узловых точках каждого из последовательно соединенных звеньев цепи согласования

$$Q = \frac{X}{R}$$

Коэффициент трансформации звена связан с нагруженной добротностью выражением

$$1 + Q^2 = K_T$$

При увеличении широкополосности цепей согласования путем наращивания числа звеньев n с постоянной добротностью Q связь между нагруженной добротностью Q и резистивным коэффициентом трансформации принимает вид

$$1 + Q^2 = \sqrt[n]{K_T}$$

Постоянство коэффициента передачи в каждом из звеньев может быть обеспечено построением вспомогательной зависимости коэффициента отражения r для фиксированного значения добротности при изменении активного сопротивления от нуля до бесконечности.

$$\frac{Z_n - Z_{нн}}{Z_n + Z_{нн}} = r$$

где r коэффициент отражения; Z – сопротивление нагрузки; $Z_n = R + jX$ – сопротивление нагрузки источника возбуждения в узловых точках каждого из последовательно соединенных звеньев.

1. Целевая функция оптимизации широкополосных согласующих цепей. Для формулировки целевой функции необходимо задаться критериями оптимизации, их весовыми коэффициентами и ограничениями на параметры многозвенных цепей согласования:

- активная составляющая выходного сопротивления цепи согласования (R) в диапазоне рабочих частот должна стремиться к стандартной величине (50 Ом);
- реактивная составляющая выходного сопротивления цепи согласования (X) в диапазоне рабочих частот должна стремиться к нулевому сопротивлению;
- для обеспечения максимальной равномерности АЧХ в диапазоне рабочих частот должно обеспечиваться равенство коэффициентов передачи каждого из звеньев цепи согласования.

Весовые коэффициенты каждого из критериев выбираются при автоматизированном методе проектирования итерационным путем в процессе оптимизации.

Структура цепи согласования (количество звеньев) определяется ограничениями на величину коэффициента стоячей волны (КСВ) в диапазоне рабочих частот. Ограничением также является требуемая неравномерность АЧХ многозвенной цепи согласования.

В качестве элементарных звеньев целесообразно использовать звенья с индуктивным сопротивлением в продольной ветви для обеспечения дополнительной фильтрации высших

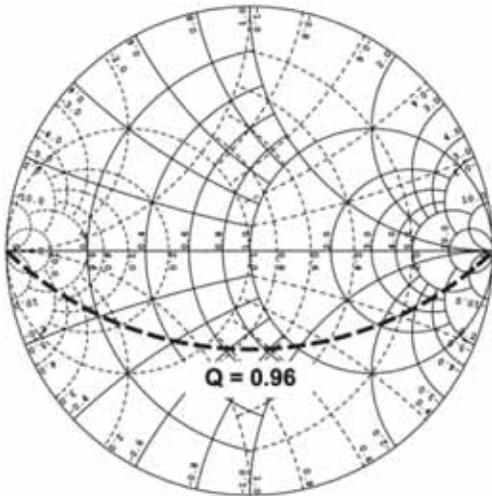


Рис. 2

гармонических составляющих на выходе активных элементов усилителей мощности.

2. Построение зависимости коэффициента отражения от активного сопротивления источника возбуждения при фиксированной добротности. Как уже отмечалось, максимальная равномерность АЧХ в диапазоне рабочих частот обеспечивается равенством коэффициентов передачи каждого из звеньев цепи согласования. С этой целью на диаграмме Смита строится зависимость коэффициента отражения от активного сопротивления нагрузки источника возбуждения при фиксированной добротности (кривая постоянной добротности), которая в дальнейшем будет служить границей при построении траекторий трансформации сопротивлений нагрузки источника сигнала в элементарных звеньях.

Алгоритм программы построения кривой постоянной добротности следующий:

В1 Ввод исходных данных.

Ввод сопротивления нагрузки усилителя мощности $R_n = 50 \text{ Ом}$.

Ввод оптимального комплексного сопротивления нагрузки транзистора $Z_{тр} = R_{тр} + jX_{тр}$, соответствующего критериям минимальных нелинейных искажений или максимальной мощности, КПД.

В2 Определение резистивного коэффициента трансформации цепи согласования.

В3 Задание числа звеньев n исходя из требуемой широкополосности цепи согласования. В широкополосных цепях согласования число звеньев задается от двух до четырех.

В3 Определение нагруженной добротности из формулы

$$Q^2 = n \sqrt{K_T - 1}.$$

В4 Задание шага построений, начального и конечного значений кривой постоянной добротности.

В5 Введение глобальных определений (Global Definitions) для переменных R, X, Z, r .

В6 Построение на диаграмме иммитансов кривой постоянной добротности.

На рис. 2 приведен коэффициент отражения при добротности $Q=0,96$, соответствующий $R_{тр} = 7,05 \text{ Ом}$; $R_n = 50 \text{ Ом}$, $n=3$.

3. Предварительная оценка номиналов элементов принципиальной схемы цепи согласования.

В7 Построение траекторий трансформации сопротивлений (рис. 3) каждым элементом принципиальной схемы осуществляется от R_n к $R_{тр}$ с учетом граничной кривой Q , обеспечивающей равенство коэффициентов передачи каждого из звеньев трехзвенной L, C цепи согласования.

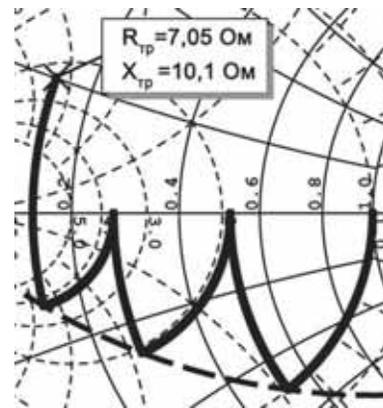


Рис. 3

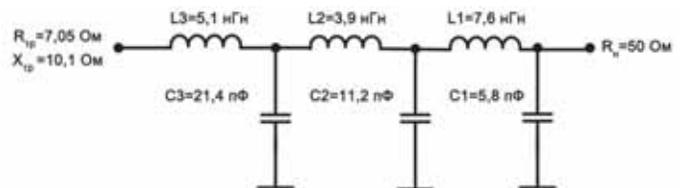


Рис. 4

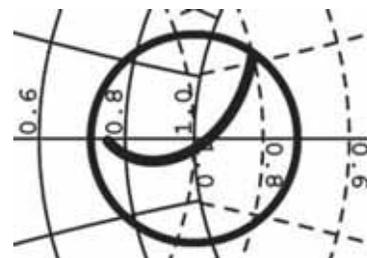


Рис. 5

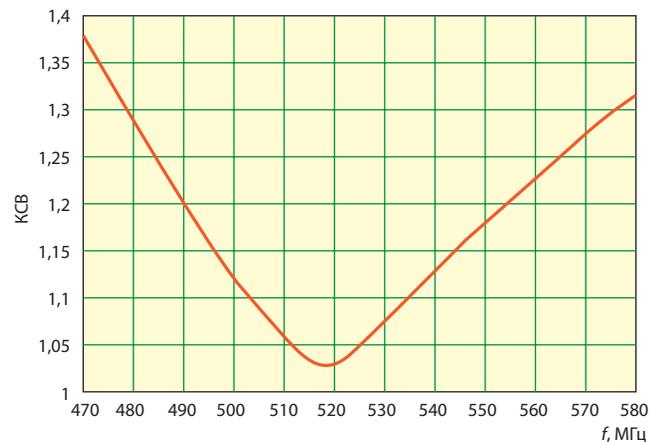


Рис. 6

печивающей равенство коэффициентов передачи каждого из звеньев трехзвенной L, C цепи согласования.

В8 Вывод принципиальной схемы цепи согласования (рис. 4), номиналы элементов которой соответствуют построениям на рис. 3.

4. Анализ качественных показателей синтезированной схемы цепи согласования.

В9 Оценка КСВ, выходного сопротивления (диапазон частот 470–582 МГц) на диаграмме Смита (рис. 5) и КСВ в прямоугольной системе координат (рис. 6) по выходу цепи согласования (ЦС).

B10 Анализ результатов оценки качественных показателей цепи согласования.

5. Параметрический синтез цепи согласования.

B11 Формулировка целевой функции многокритериальной оптимизации цепи согласования.

Пакет программ позволяет провести параметрический синтез принципиальной схемы по заданным критериям качества. Вначале нужно задаться критериями оптимизации и весовыми коэффициентами для каждого из них, т.е. сформулировать целевую функцию многокритериальной оптимизации. Необходимо минимизировать:

1) отличие от 50 Ом действительной части выходного сопротивления цепи согласования в рабочем диапазоне частот 470—582 МГц. Весовой коэффициент для данного критерия оптимизации принят равным 0,5;

2) отличие от 0 Ом мнимой части выходного сопротивления цепи согласования в рабочем диапазоне частот 470—582 МГц. Весовой коэффициент для данного критерия оптимизации принят равным 0,5.

B12 Установка ограничений на величину КСВ.

B13 Установка ограничений на величину переменных параметров цепи согласования.

Устанавливаем минимальные и максимальные значения параметров $L1, L2, L3, C1, C2, C3$ оптимизируемой цепи согласования.

B14 Выбор метода оптимизации.

В диалоговом окне из списка методов оптимизации выбираем *Pointer — Robust Optimization*.

B15 Оптимизация.

Задаем максимальным количеством итераций и запускаем процесс оптимизации.

B16 Построение КСВ и годографа выходного сопротивления в диапазоне рабочих частот (470—582 МГц) на диаграмме Смита по окончании процесса оптимизации (рис. 7).

B17 Построение КСВ в прямоугольной системе координат после оптимизации (рис. 8).

B18 Построение зависимости действительной части выходного сопротивления Z_{11} от частоты.

B19 Построение зависимости мнимой части выходного сопротивления Z_{11} от частоты.

B20 Проверка соответствия переменных параметров выбранным ограничениям. При неудовлетворительных результатах идти к **B13**.

B21 Уточнение весовых коэффициентов целей оптимизации. При необходимости идти к **B11**.

B22 Уточнение максимального числа итераций. При необходимости идти к **B15**.

B23 Выбор другого метода оптимизации. При необходимости идти к **B14**.

B24 Вывод схемы оптимальной цепи согласования (рис. 9).

B25 Построение траекторий трансформации сопротивлений элементами оптимальной цепи согласования (рис. 10).

При удовлетворительных результатах оптимизации программа завершает свою работу.

В результате в соответствии с алгоритмами **A1—A14, B1—B25** создана программа структурно-параметрического синтеза широкополосных цепей согласования.

Заключение. Метод структурно-параметрического синтеза широкополосных согласующих цепей по заданной многокритериальной целевой функции для усилителей мощности телевизионных передатчиков, представленный в виде алгоритмов **A1—A14** и **B1—B25**, позволяет решить задачи выбора оптимального числа звеньев и минимизации КСВ.

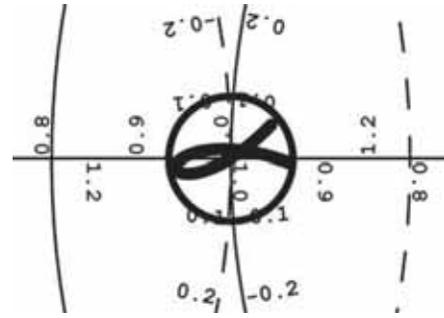


Рис. 7

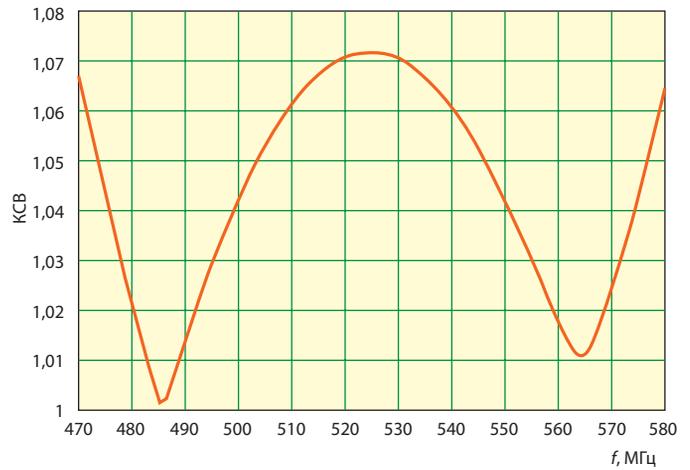


Рис. 8

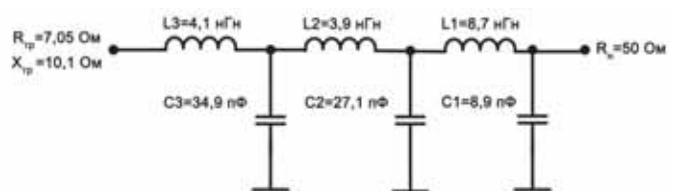


Рис. 9

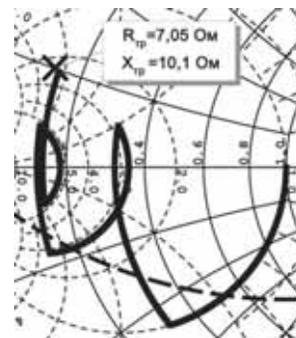


Рис. 10

Сравнение траекторий трансформации (см. рис. 3 и 10) подтверждает эффективность алгоритма предварительной оценки номиналов элементов принципиальной схемы цепи согласования.

Результаты оптимизации усилителя мощности позволяют обеспечить минимум нелинейных искажений (см. таблицу) при высоких требованиях по согласованию (см. рис. 7 и 8) в широком диапазоне частот (IV диапазон наземного ТВ-вещания) и сохранении номинальных энергетических параметров исследуемого усилителя мощности на полевом транзисторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чижов А.И.** Структурный анализ несимметричных реактивных СВЧ-четырёхполюсников относительно условий согласования /А.И. Чижов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — Т. 12. — № 2. — 2009. — С. 62—69.
2. **Онищук А.Г.** Структурно-параметрический синтез трехэлементных согласующих цепей для пассивного двухполюсника /А.Г. Онищук, Д.В. Пегасин, М.В. Пегасин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — Т. 12. — № 2. — 2009. — С. 111—115.
3. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов / **В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.**; Под ред. В.В.Шахгильдяна. Изд. 3-е. — М.: Радио и связь, 2003. — 560 с.
4. **Bichler A.J.** An Introduction to Broadband Impedance Transformation for RF Power Amplifiers/ A.J.Bichler // High Frequency Electronics, January 2009, p. 34—46.
5. **Карякин В.Л.** Устройства генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: Учебник для вузов/ В.Л. Карякин. — М.: Радио и связь, 2007. — 433 с.
6. **Карякин Д.В.** Применение САПР «Telecom-MWO» в проектировании телекоммуникационных систем и устройств / Д.В. Карякин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 12. — 2009. — № 2. — С. 91—98.

Получено 15.07.10