

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОГЛАСУЮЩЕЙ ЦЕПИ НА ОСНОВЕ Z- (Y-) МАТРИЦ И АЛГОРИТМА ЛЕВЕНБЕРГА – МАРКВАРДТА

А. С. КОНОПЛИЦКИЙ,

к. т. н.

Оперативно-аналитический центр
при Президенте Республики Беларусь

М. А. ЯНЦЕВИЧ,

к. т. н.

Военная академия Республики Беларусь

Предложена методика структурно-параметрического синтеза широкополосных согласующих цепей на основе z- (y-) матриц и алгоритма Левенберга – Марквардта, позволяющая синтезировать широкополосные согласующие цепи для сложных комплексных сопротивлений генератора и нагрузки. Показана возможность применения предложенной методики совместно со среднестепенным критерием, обеспечивающей синтез структуры и значений элементов цепи с пониженной характеристикой коэффициента стоячей волны.

Ключевые слова: широкополосное согласование, комплексная нагрузка, характеристика КСВ, структурно-параметрический синтез.

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение характеристик приемопередающих систем является одной из важнейших радиотехнических задач, значимость которой возрастает в связи с освоением новых диапазонов частот, использованием широкополосных сигналов со сложной структурой и их внедрением в современные системы радиолокации, радионавигации, телевидения, мобильной связи, телевидения. Важной частью общей проблемы создания современных приемопередающих систем является проблема широкополосного согласования произвольных иммитансов источника сигнала и нагрузки в произвольном электрическом элементном базисе и воспроизведения требуемых частотных характеристик [1]. Она является сложной в теоретическом плане, но ее решение представляет большую практическую значимость, так как обеспечивает оптимальное построение широкополосных радиотехнических трактов.

В связи с широким использованием вычислительной техники, развитием теории решения систем нелинейных уравнений, а также

усложнением вида согласуемых нагрузок и ужесточением требований к уменьшению вносимых частотных искажений большое внимание уделяется автоматизированным системам поиска решений, основанным на численных методах синтеза. В качестве численных методов в основном используют *параметрический метод* и *метод вещественных частот* [1–5]. Данные методы характеризуются простотой и универсальностью, а также позволяют значительно улучшить характеристики цепи, рассчитанной аналитическим методом. Главный их недостаток – разработчик не может контролировать структуру и значения элементов согласующей цепи в процессе синтеза. Этот недостаток учитывается в *методах систематического поиска и визуального проектирования на основе диаграммы Вольперта – Смита* [3], которые являются одними из современных методов автоматизированного синтеза реактивных согласующих цепей. Однако успешное применение данных методов требует определенного уровня квалификации и опыта. Кроме того, во время

расчета согласующей цепи невозможно контролировать полосу пропускания, так как расчет осуществляется на одной частоте.

В сравнении с вышеперечисленными подходами более эффективным считается *структурно-параметрический метод синтеза*, представленный в [1, 4, 5]. Он позволяет совместно определить структуру искомой цепи и параметры ее элементов. Однако данный метод требует выполнения ряда дополнительных математических операций, к примеру, организации синтеза при использовании Т-матрицы, когда нагрузка в большинстве случаев представлена Z-матрицей, а также необходимость определения иерархии возможных компонентов реактивных элементов и их описание, что приводит к неоптимальным или функционально-перенасыщенным схемам. При этом данный метод ввиду своих преимуществ может выступать в качестве базового при реализации универсальной методики синтеза согласующих цепей, учитывающей приведенные выше недостатки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для решения задачи синтеза согласующей цепи разработана методика структурно-параметрического синтеза на основе наращивания и чередования последовательно-параллельных контуров. Она состоит из шести этапов и включает в себя [4]:

1. Задание и оценка исходных данных. В качестве исходных данных задаются сопротивление источника и нагрузки, требуемые частотные характеристики (например, минимальный уровень амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), неравномерность характеристики группового времени запаздывания (ГВЗ) и максимальный уровень характеристики коэффициента стоячей волны (КСВ) широкополосной согласующей цепи в полосе пропускания); требуемый диапазон рабочей частоты, начальные приближения реактивных элементов наращиваемых ветвей, а также максимальное количество каскадов.

2. Формирование критерия, по которому определяются свойства согласующей цепи. В качестве критериев оценки характеристик согласующих цепей предлагается применять два широко используемых критерия оценки: чебышевский и среднестепенной [1–5].

3. Представление согласующей цепи в виде лестничного соединения и задание реактивных элементов. Согласующая цепь представляется в виде лестничного соединения, состоящего из n в общем случае различных реактивных сопротивлений [4]. Для определения структуры каждый каскад согласующей цепи представляется в виде последовательной или параллельной ветви. Последовательная ветвь состоит из последовательно соединенных элементов: катушки индуктивности и конденсатора. Параллельная ветвь

состоит из параллельно соединенных элементов: конденсатора и катушки индуктивности. В частном случае в процессе оптимизации в последовательной ветви один из элементов может оказаться отрицательным или равным нулю. В таком случае вместо данного элемента устанавливается короткое замыкание, то есть он считается «Проводом». Параллельная ветвь представляет собой параллельное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Если в случае оптимизации параллельной ветви один из элементов контура также оказывается отрицательным или равным нулю, то данный элемент заменяется «Разрывом».

На каждом этапе наращивания и чередования последовательно-параллельных каскадов формирует коэффициент передачи. С учетом этого возникает необходимость в нахождении собственных параметров четырехполюсника, описанным различной матричной формой. Синтезируемая минимально-фазовая цепь представляется реактивным четырехполюсником, представленным в матричной форме:

$$z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix},$$

Где z и y – матрица параметров холостого хода (z -параметры) и короткого замыкания (y -параметры); z_{ij} и y_{ij} – собственные параметры четырехполюсника.

Функции собственных параметров несимметричных четырехполюсников определяются в зависимости от их вида:

- для Т-образного несимметричного четырехполюсника [2]:

$$z(s) = \begin{bmatrix} z_{11}(s) & z_{12}(s) \\ z_{21}(s) & z_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1 s}{Z_3 s} & Z_1 s + Z_2 s + \frac{Z_1 s \times Z_2 s}{Z_3 s} \\ \frac{1}{Z_3 s} & 1 + \frac{Z_1 s}{Z_3 s} \end{bmatrix};$$

- для П-образного несимметричного четырехполюсника [2]:

$$y(s) = \begin{bmatrix} y_{11}(s) & y_{12}(s) \\ y_{21}(s) & y_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_1 s}{Y_3 s} & \frac{1}{Y_3 s} \\ Y_1 s + Y_2 s + \frac{Y_1 s \cdot Y_2 s}{Y_3 s} & 1 + \frac{Y_1 s}{Y_3 s} \end{bmatrix};$$

Широкополосная согласующая цепь, содержащая более сложную структуру (большее количество каскадов), разбивается на группу простейших каскадно-соединенных Г-, Т- или П-образных четырехполюсников. Матрицы простейших каскадно-соединенных четырехполюсников, с известными параметрами, перемножаются между

собой с применением правила линейной алгебры умножения строк первой матрицы на столбцы второй.

Рабочие характеристики четырехполюсника целесообразно оценить по коэффициенту передачи по напряжению, который определяется через собственные параметры четырехполюсника [3]:

$$K(s) = \frac{2 \times \sqrt{\operatorname{Re} Z_c(s) \times \operatorname{Re} Z_H(s)} \times z_{21}(s)}{(Z_c(s) + z_{11}(s)) \times (Z_H(s) + z_{22}(s)) - z_{21}(s)^2}, \quad (1)$$

или

$$K(s) = \frac{2 \times \sqrt{\operatorname{Re} Y_c(s) \times \operatorname{Re} Y_H(s)} \times y_{21}(s)}{(Y_c(s) + y_{11}(s)) \times (Y_H(s) + y_{22}(s)) - y_{21}(s)^2}. \quad (2)$$

где $Z_c(s)$ и $Z_H(s)$ ($Y_c(s)$ и $Y_H(s)$) – комплексное сопротивление (проводимость) источника сигнала и нагрузки.

Структурно-параметрический синтез осуществляется на основе метода оптимизации Левенберга – Марквардта, представленный в [4].

4. Выбор первого каскада (последовательная либо параллельная ветвь). Для определения структуры первого каскада, синтезируется две согласующие цепи. Первая согласующая цепь содержит в своей структуре последовательную ветвь, представленную в виде последовательного контура, состоящего из катушки индуктивности и конденсатора. Вторая согласующая цепь, представлена параллельной ветвью, состоящей из параллельно соединенных элементов: конденсатора и катушки индуктивности. Для выбранных схем формируется коэффициент передачи (1) или (2), в зависимости от собственных параметров четырехполюсника, и осуществляется оптимизация синтезируемых согласующих цепей на основе метода Левенберга – Марквардта. Реактивные элементы проверяются на физическую реализуемость, а также производится оценка на основе целевой функции степени удовлетворения вариантов требованиям, отбор лучшего решения и создание следующего поколения (наращивания).

5. Нарращивание чередующихся последовательно-параллельных ветвей. После наращивания и чередования второго каскада параметры реактивных элементов синтезируемой цепи оказываются неоптимальными и требуется повторный расчет ее параметров. В результате чего, осуществляется формирование передаточной функции синтезируемой цепи и выполняется пересчет параметров реактивных элементов, за счет процедуры оптимизации. Добавление в схему согласующей цепи любого нового каскада сопровождается повторным циклическим пересчетом всех параметров реактивных элементов синтезированной цепи, выполняемым

до обеспечения требуемого приближения функции передачи синтезируемой цепи к требуемой характеристике или заданного количества каскадов [4].

6. Анализ параметров синтезируемой цепи и ее частотных характеристик. В качестве частотных характеристик синтезируемой цепи представляются АЧХ и характеристика ГВЗ, а также характеристика КСВ. При анализе параметров синтезируемых широкополосных согласующих цепей элементы схемы прототипа денормируются относительно нормирующего сопротивления $R_{\text{норм}}$ и нормирующей граничной частоты $f_{\text{норм}}$, используя соотношения:

$$R = R_{\text{норм}} R^H; \quad L = L^H \frac{R_{\text{норм}}}{\omega_{\text{норм}}}; \quad C = \frac{C^H}{R_{\text{норм}} \omega_{\text{норм}}},$$

где R^H , L^H и C^H – нормированные значения сопротивлений, индуктивностей и емкостей фильтра-прототипа.

Для реализации элементов полученной широкополосной согласующей цепи в СВЧ-диапазоне с распределенными параметрами выберем отрезки микрополосковых линий, использующие чередование отрезков линий с высоким z_B и z_H низким волновым сопротивлением. Например, длина отрезков, реализующих элементы СВЧ-низкочастотного четырехполюсника:

$$l_L = \frac{1}{\beta_B} \arcsin \frac{\omega_{\text{норм}} L}{Z_B}, \quad l_C = \frac{1}{\beta_B} \arcsin \omega_{\text{норм}} C z_H,$$

где $\beta_{B, H}$ – фазовые постоянные высокоомной и низкоомной линии.

Также исследуются ограничения, связанные с потерями в реальных контурах на элементах с сосредоточенными параметрами обусловленные добротностью реальных индуктивных и емкостных элементов, а также потерями в проводниках и в диэлектрике соединительных отрезков планарных линий передачи. Потери, которые определяют добротность индуктивности, представленной сосредоточенными параметрами, определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{\omega L}{R_L},$$

где R_L – сопротивление, учитывающее активные потери в индуктивности.

Основными критериями для выбора индуктивностей поверхностного монтажа являются: частота собственного резонанса; добротность; габаритные размеры.

Добротность конденсатора характеризует его способность запасать энергию электрического поля. Современные конденсаторы имеют высокую добротность и на частотах рассматриваемых диапазонов составляют примерно 1000 единиц.

С учетом этого сопротивление потерь таких емкостей составляет миллионные доли ома и при моделировании цепей его можно не учитывать.

Предложенная методика позволяет получать реализуемые на практике схемы широкополосных частотно-избирательных и согласующих цепей с высокими техническими характеристиками (обеспечивающие минимальные частотные искажения широкополосных сигналов), сократить время и трудоемкость их синтеза.

Рассмотрим пример, где необходимо синтезировать шести элементную широкополосную согласующую цепь, согласующей в диапазоне частот 0,3–1 рад/с комплексное сопротивление источника и нагрузки (рисунок 1). Эта задача была рассмотрена в [2] и затем использовалась как тестовая в [5]. В качестве критерия оценки применялось приближение АЧХ синтезируемой цепи к характеристикам идеального фильтра, которое осуществлялось за счет применения среднестепенного критерия. Для адекватного сравнения методов данные критерии будем использовать при синтезе широкополосной согласующей цепи.

Схемы и характеристики широкополосных согласующих цепей, синтезированных различными методами, приведены на рисунке 2 и 3.

Частотная зависимость КСВ широкополосной согласующей цепи 6-го порядка, синтезированной с применением предложенной методики структурно-параметрического синтеза на основе наращивания и чередования последовательно-параллельных контуров в большей части полосы пропускания (от 0,6 до 1 рад/с), по своим свойствам близка к частотным зависимостям КСВ схем, показанных на рисунках 2а и 2б. Однако характерным отличием синтезированной цепи от цепей, синтезированных на основе метода вещественных (реальных) частот [2] и с применением автоматизированного синтеза широкополосных согласующих устройств [5], является то, что вблизи нижней (0,3–0,5 рад/с) полосы пропускания характеристика КСВ принимает

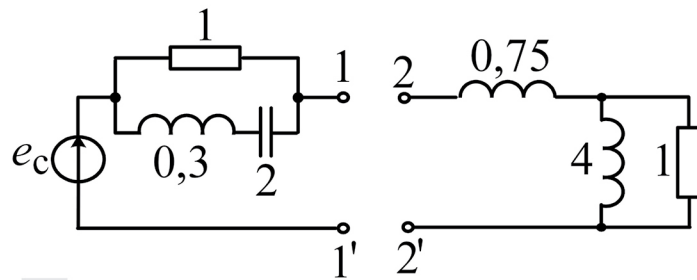


Рисунок 1. Согласуемые импедансы источника сигнала и нагрузки

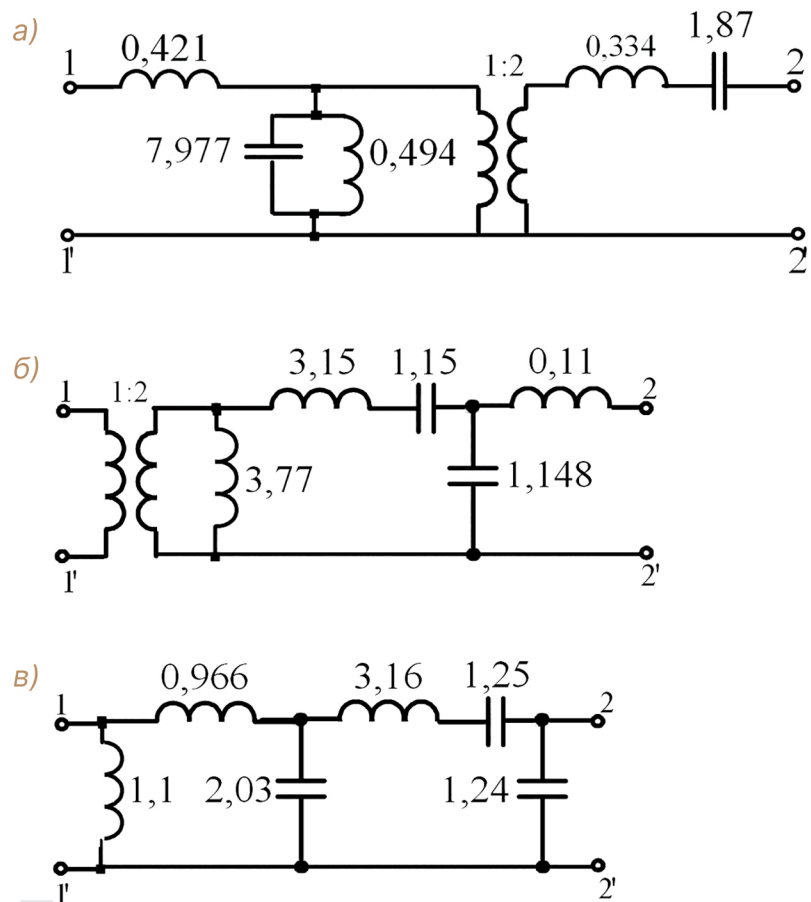


Рисунок 2. Схема широкополосной согласующей цепи, синтезированная методами реальной частоты [2] (а), автоматизированного синтеза широкополосных согласующих устройств [5] (б) и структурно-параметрическим методом на основе наращивания и чередования последовательно-параллельных контуров [4] (в)

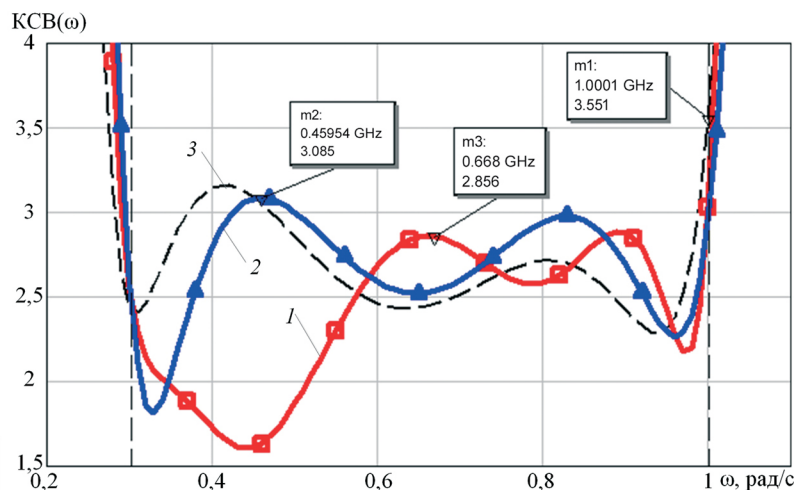


Рисунок 3. Характеристики КСВ схем согласующих цепей, показанных на рисунках 2а (3), 2б (2), 2в (1)

пониженные значения. Максимальное значение характеристики КСВ синтезированной цепи в рассматриваемой полосе пропускания составляет 2,85. В то же время максимальные значения данной характеристики цепей, показанных на рисунках 2 (а, б), составляют 3,5 и 3,08, соответственно. Данное преимущество обеспечивается за счет использования широкополосной цепи, синтезированной с применением методики структурно-параметрического синтеза на основе z - (y -) матриц и алгоритма Левенберга – Марквардта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана методика структурно-параметрического синтеза согласующих цепей на основе z - (y -) матриц и алгоритма Левенберга – Марквардта, позволяющая

синтезировать согласующие цепи для сложных комплексных сопротивлений генератора и нагрузки. Показана возможность применения предложенной методики, обеспечивающей полный контроль структуры и значений элементов цепи с требуемыми частотными характеристиками. Выполнен анализ характеристик КСВ цепей для сложных комплексных сопротивлений генератора и нагрузки, синтезированных с использованием разработанной методики, и показано уменьшение максимального значения характеристики КСВ с 8 до 22% по сравнению с известными численными методами.

Методика структурно-параметрического синтеза позволяет получать реализуемые на практике схемы согласующих цепей с высокими техническими характеристиками (обеспечивающие минимальные частотные искажения широкополосных сигналов) и повышает скорость математического моделирования синтезируемой цепи с заранее неизвестной структурой за счет снижения трудоемкости синтеза цепей.

В дальнейшем планируется распространить описанный метод на другие виды устройств. Например, реализовать возможность синтеза с использованием моделей элементов с учетом потерь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, А. Д. Структурно-параметрический синтез четырехполюсников при широкополосном согласовании и моделировании на основе аппарата Т-матриц : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 / А. Д. Васильев. – Минск, 2010. – 121 л.
2. Yarman B. S. Computer-aided double matching via parametric representation of Brune functions / B. S. Yarman, A. Fettweis // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1990. – CAS-37. – P. 212–222.
3. Самуилов А. А. Методика «визуального» проектирования цепей на сосредоточенных элементах для широкополосного согласования двух комплексных нагрузок / А. А. Самуилов, М. В. Черкашин, Л. И. Бабак // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2 (28). – С. 30–39.
4. Шашок, В. Н. Методика определения структуры и параметров многополосных согласующих цепей на основе внутриполосного комплексного критерия соответствия идеальному фильтру / В. Н. Шашок, А. С. Коноплицкий // Докл. БГУИР. – 2020. – № 4. – С. 62–70.
5. Девятков, Г. Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.07 / Г. Н. Девятков. – Новосибирск, 2006. – 424 с.

The article proposes a method of structural-parametric synthesis based on the build-up and alternation of series-parallel circuits in combination with a complex criterion for matching an ideal filter in the bandwidth, which allows synthesizing broadband matching circuits for complex complex generator and load impedances. The advantage of the technique is the ability to control the structure and values of the circuit elements, providing increased uniformity of the amplitude-frequency response and linearity of the phase-frequency response.

Keywords: broadband matching, complex load, SWR characteristics, structural-parametric synthesis.