

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*А. Л. Гапунин, В. С. Жилков, В. С. Кармакулов,  
Б. Н. Бальзамов, В. В. Устименко, О. Т. Тильгин*

Х а р ь к о в

Известно, что максимальная мощность, отдаваемая СВЧ-генератором в нагрузку, и электрическая прочность линии передачи СВЧ-энергии в значительной степени зависят от того, как генератор и нагрузка согласованы с линией передачи. Поэтому линии передачи радиотехнических систем, состоящие, как правило, из целого ряда специальных элементов, вносящих рассогласование, всегда нуждаются в согласовании. Особенно остро этот вопрос ставится при работе системы на больших уровнях мощности.

Из известных устройств для согласования (диафрагмы, штыри, шлейфовые трансформаторы, трансформаторы на неоднородностях) трудно выбрать хотя бы одно, удовлетворяющее требованию обеспечения широкополосного согласования при быстродайствии  $\sim 1$  мин. Таким требованиям удовлетворяет лишь автоматическое согласующее устройство, работа которого основана на поддержании экстремального значения сигнала во вторичном плече линии, пропорционально подающей или отраженной волне мощности. Настройка на экстремум совершенно не связана с частотой сигнала и может быть выполнена практически в любой точке рабочей полосы волновода.

Основные элементы автоматического трансформатора полных сопротивлений (рис. 1): датчик режима работы линии передачи, состоящий из направленного ответвителя (НО) и детекторной секции; экстремальный регулятор (ЭР) и непосредственно трансформатор — трансформатор полных сопротивлений.

Назначением датчика режима работы линии является преобразование сигнала, характеризующего степень рассогласования линии, в ток либо напряжение, подаваемое на вход экстремального регулятора. Сигнал поступает на механизм управления исполнительными двигателями, и начинается процесс поиска экстремума.

В данной статье рассматриваются особенности согласования линий многоэлементным трансформатором, образованным неоднородностями типа «сфера», которые имеют одну степень свободы — перемещение вдоль оси параллельно узкой стенке волновода.

### Трансформатор полных сопротивлений

Трансформатор полных сопротивлений (рис. 2) представляет собой отрезок линии передачи с четырьмя сферами, расстояние между которыми вдоль оси  $z$  может изменяться в процессе регулировки.

Диапазон согласования для данного трансформатора определяется из выражения

$$\Gamma = \frac{A}{B}, \quad (1)$$

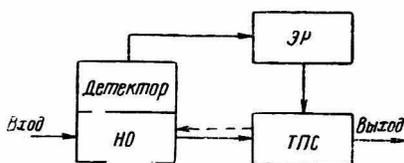


Рис. 1.

где  $\Gamma$  — входной коэффициент отражения трансформатора:

$$\begin{aligned}
 A = & p_1 a_1^3 + p_2 a_2^3 e^{-i2\beta_{10} S_{12}} + p_3 a_3^3 e^{-i2\beta_{10} S_{13}} + p_4 a_4^3 e^{-i2\beta_{10} S_{14}} + \\
 & + p_1 p_2 a_1^3 a_2^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{12}}) + p_1 p_3 a_1^3 a_3^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{13}}) + \\
 & + p_1 p_4 a_1^3 a_4^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + p_2 p_3 a_2^3 a_3^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{13}}) + \\
 & + p_2 p_4 a_2^3 a_4^3 (e^{-i2\beta_{10} S_{12}} - e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + p_3 p_4 a_3^3 a_4^3 (e^{-i2\beta_{10} S_{13}} - \\
 & - e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + p_1 p_2 p_3 a_1^3 a_2^3 a_3^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{12}} + e^{-i2\beta_{10} S_{13}}) + \\
 & + p_1 p_2 p_4 a_1^3 a_2^3 a_4^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + p_1 p_3 p_4 a_1^3 a_3^3 a_4^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{13}} + \\
 & + e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + p_2 p_3 p_4 a_2^3 a_3^3 a_4^3 (e^{-i2\beta_{10} S_{12}} - e^{-i2\beta_{10} S_{13}} + e^{-i2\beta_{10} S_{14}}) + \\
 & + p_1 p_2 p_3 p_4 a_1^3 a_2^3 a_3^3 a_4^3 (1 - e^{-i2\beta_{10} S_{12}} + e^{-i2\beta_{10} S_{13}} - e^{-i2\beta_{10} S_{14}}); \\
 B = & 1 + p_1 p_2 a_1^3 a_2^3 + p_1 p_3 a_1^3 a_3^3 + p_1 p_4 a_1^3 a_4^3 + p_2 p_3 a_2^3 a_3^3 + \\
 & + p_2 p_4 a_2^3 a_4^3 + p_3 p_4 a_3^3 a_4^3 + p_1 p_2 p_3 p_4 a_1^3 a_2^3 a_3^3 a_4^3;
 \end{aligned}$$

$$p_1 = \frac{8\pi k^2 (\epsilon - 1)}{\beta_{10} d h (\epsilon + 2)} \sin \frac{\pi}{d} x_1; \quad p_2 = \frac{8\pi k^2 (\epsilon - 1)}{\beta_{10} d h (\epsilon + 2)} \sin \frac{\pi}{d} x_2;$$

$$p_3 = \frac{8\pi k^2 (\epsilon - 1)}{\beta_{10} d h (\epsilon + 2)} \sin \frac{\pi}{d} x_3; \quad p_4 = \frac{8\pi k^2 (\epsilon - 1)}{\beta_{10} d h (\epsilon + 2)} \sin \frac{\pi}{d} x_4;$$

$a$  — радиус сферы;

$h$  — высота волновода;

$b$  — ширина волновода;

$S_{12}, S_{13}, S_{14}, x$  — даны на рис. 2.

$$\beta = k \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2d}\right)^2}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Из выражения (1) можно легко получить и выражения коэффициента отражения для трех-, двух- и одноэлементных устройств. Как следует из формулы (1), динамический диапазон определяется количеством рассеивателей, их диаметром,  $\epsilon'$  и длиной волны [1].

На графиках рис. 3 и 4 приведена зависимость коэффициента отражения для трех и четырех рассеивателей. Трансформатор полных сопротивлений с тремя рассеивателями характеризуется диапазоном согласования по коэффициенту отражения от 0,03 до 0,5 с четырьмя рассеивателями диапазоном согласования от 0,03 до 0,8. Из графиков видно

также, что зависимость от расстояния между рассеивателями носит экстремальный характер. Такой характер зависимости коэффициента отражения существенно упрощает схему всего устройства.

В автоматических системах часто необходимо настраивать управляющий орган так, чтобы обеспечивалось экстремальное значение выходного параметра. Данному требованию удовлетворяет целый ряд известных систем. Например, системы с управлением по производной, в которых при сканировании определяется наклон в каждой точке кривой и затем управляющий орган перестраивается, в результате чего увеличивается выход системы. Подобные системы способны определить положение

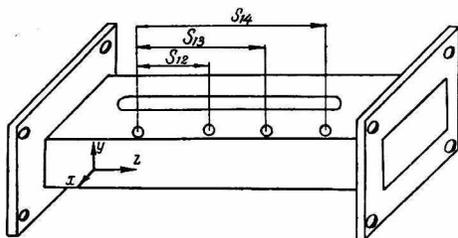


Рис. 2.

ние экстремума лишь на кривой с одним экстремумом, при этом наклон ее должен быть таким, чтобы система могла определить направление управляющего сигнала [2].

В предлагаемом устройстве эти ограничения не имеют места. Система способна реагировать на характеристики, имеющие более одного экстремума, а так как реальная зависимость коэффициента отражения  $|\Gamma|$  от перемещения рассеивателей (неоднородностей) имеет несколько локальных экстремумов, применение этой системы для автоматического трансформатора полных сопротивлений вполне оправдано. Система настраивает управляющий орган на наибольший экстремум по всему диа-

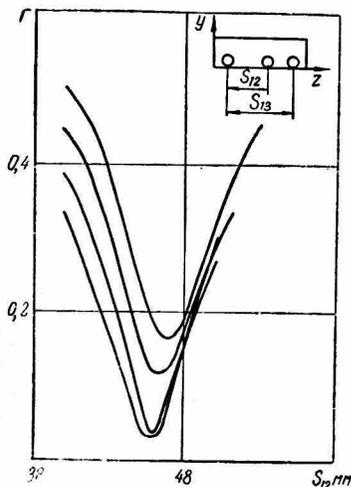


Рис. 3.

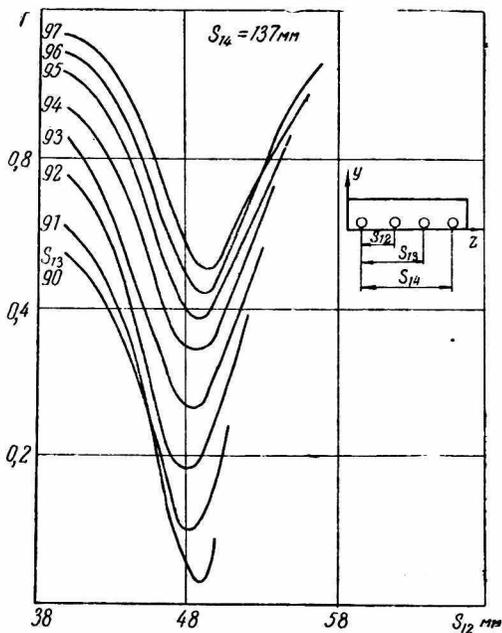


Рис. 4.

пазону настройки. Она правильно работает также при кривых, имеющих сравнительно длинные и плоские участки, на которых производная если и отлична от нуля, то практически неопределима.

Последовательность выполняемых операций в точности соответствует действию оператора, который настраивает аппаратуру, имеющую характеристики, описанные выше. Обычно оператор для перестройки системы в новую рабочую точку изменяет настройку по всему диапазону, отмечая амплитуды наблюдаемых пиков, и затем возвращает настройку в положение, соответствующее экстремальному значению сигнала. Рассматриваемое автоматическое устройство, называемое системой «сканирования с запоминанием», выполняет точно такие же операции. Блок-схема данной системы представлена на рис. 5.

В начале цикла управляемый орган проходит весь диапазон настройки — рассеиватель перемещается в свое крайнее положение. Выходной сигнал с выхода детекторной секции поступает на блок УПТ, где усиливается. Затем усиленный сигнал поступает на схему запоминания устройства обработки первичной информации (УОПИ). Устройство обеспечивает запоминание глобального экстремума функции коэффициента

отражения в зависимости от перемещения рассеивателей. При достижении управляющим органом конца диапазона настройки срабатывает чувствительный элемент, который коммутирует сигнал, несущий информацию о текущем значении коэффициента отражения со схемы запоминания на схему измерения текущего значения.

Рассеиватель начинает двигаться в обратном направлении. Усиленный сигнал поступает на схему измерения текущего значения устройства обработки первичной информации. Сигналы с выхода устройства обработки первичной информации поступают на входы анализатора.

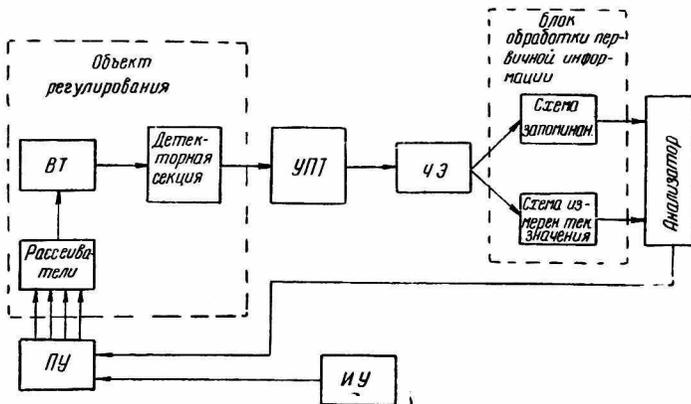


Рис. 5.

В тот момент, когда напряжение с выхода схемы измерения текущего значения равно напряжению с выхода схемы запоминания, срабатывает анализатор, который отключает цепь питания электромагнитной муфты программного устройства (ПУ), тем самым разрывая механическую связь выходного вала исполнительного устройства (ИУ) с рассеивателем. Таким образом, управляющий орган останавливается в точке, соответствующей экстремальному значению определяемой величины.

Программное устройство осуществляет поочередное подключение каналов регулирования, и в каждом начале цикл настройки повторяется.

В процессе аппаратной реализации данной системы могут возникнуть различного рода трудности, связанные с поиском экстремума. Во-первых, так как для остановки двигателя исполнительного устройства (ИУ) требуется точное согласование напряжений, даже небольшое изменение чувствительности анализатора может не допустить своевременного отключения двигателя. Во-вторых, если импульс, подающий команду на электромагнитную муфту, начинается в момент подхода к экстремуму, неизбежен переброс системы, вызывающий ошибку установки.

Если нестабильность в работе системы затрудняет точное согласование сравниваемых напряжений, следует выдавать импульс на остановку системы в момент, когда мгновенное значение напряжений становится равным 0,8 напряжения запоминания и вводить задержку приложения этого сигнала так, чтобы система останавливалась точно вблизи экстремума.

Отклонение от нормальной работы вызывается погрешностями, обусловленными причинами различного характера (инерционность, зона нечувствительности, люфт в механических частях системы и т. д.); в общем случае все эти погрешности носят случайный характер. Обозначив по-

грешность всей системы через  $\Delta$  и предположив, что частные составляющие подчиняются нормальному закону, можно написать

$$\Delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2}, \quad (2)$$

где  $\delta_1$  — погрешность схемы запоминания;  
 $\delta_2$  — погрешность, вызванная дрейфом нуля УПТ;  
 $\delta_3$  — погрешность, обусловленная зоной нечувствительности анализатора;  
 $\delta_4$  — погрешность из-за люфта в механических частях системы;  
 $\delta_5$  — погрешность, обусловленная инерционностью.

Кроме погрешностей важным параметром, характеризующим работу системы экстремального регулирования, является быстроедействие системы. Время поиска экстремума в системе, блок-схема которой представлена на рис. 5, при наличии одного рассеивателя равно

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (3)$$

где  $t_1$  — постоянная времени исполнительного устройства;  
 $t_2, t_3, t_4$  — постоянная времени УПТ, устройства обработки первичной информации, программного устройства.

Постоянная времени исполнительного устройства

$$t_{и.у} = t'_{и.у} + t''_{и.у} + t'''_{и.у}.$$

Здесь  $t'_{и.у}$  — постоянная времени исполнительного двигателя;  
 $t''_{и.у}$  — время перемещения рассеивателя;  
 $t'''_{и.у}$  — потери времени, обусловленные люфтом в механических частях исполнительного устройства.

Как видно из уравнения (3), время поиска экстремума обусловлено в основном постоянной времени исполнительного устройства, т. е. временем перемещения рассеивателя. Постоянные времени остальных блоков системы малы по сравнению с постоянной времени исполнительного устройства и при вычислении времени поиска экстремума их можно не учитывать.

Для достижения наиболее эффективных результатов, т. е. обеспечения минимального значения коэффициента отражения, в волноводный тракт вводится четыре рассеивателя и осуществляется автоматическое регулирование соответственно четырех элементов. Тогда время поиска экстремума в волноводном тракте с четырьмя рассеивателями

$$T_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^4 T_i.$$

Время поиска экстремума обуславливается в основном временем перемещения рассеивателей, поэтому для ускорения процесса поиска необходимо увеличить скорость перемещения рассеивателей, но это, в свою очередь, приводит к понижению точности системы. Оптимальное время поиска экстремума может быть выбрано после проведения эксперимента, когда будет принято компромиссное решение между скоростью перемещения неоднородности и сохранением достаточной точности системы. Ориентировочно можно сказать, что время нахождения экстремума не будет превышать одной минуты, и система при данном времени будет иметь достаточную точность.

Таким образом, показана возможность построения автоматического трансформатора полных сопротивлений, характеризующегося частотным диапазоном, соответствующим полосе пропускания волновода и диапазоном согласования по  $[\Gamma] \approx (0,03 \div 0,8)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

Е. Л. Пиротти, К. Ф. Кравченко, Н. А. Хижняк. Доклады  
АН УССР, серия А № 5, 1970.

П. И. Чинаев. Самонастраивающиеся системы. Машгиз, 1963.