

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СИММЕТРИЧНЫХ МАГАЗИНОВ ЗАТУХАНИЯ

М. С. РОЙТМАН, В. Н. СТУДЕНИКИН

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Симметричный магазин затухания представляет собой четырехполюсник лестничного типа, выполненный на активных сопротивлениях.

Если его коэффициент передачи на постоянном токе зависит от разброса параметров элементов схемы, то на повышенных частотах начинает сказываться дополнительная частотная погрешность из-за наличия реактивных проводимостей. В этом случае эквивалентная схема имеет сложный вид и частотные свойства четырехполюсника будут определяться соотношением реактивных величин в элементах, из которых выполнены звенья.

Частотная погрешность магазинов затухания составляет  $1 \div 3\%$ , и ее измерение вызывает определенные трудности. Однако, известно, что в минимально-фазовых цепях существует однозначная связь между фазовыми и частотными характеристиками. Частотную погрешность для таких четырехполюсников значительно проще получить, используя фазовые соотношения, так как угол наклона фазовой характеристики больше угла наклона частотной характеристики.

Чтобы использовать фазовые соотношения, необходимо выяснить влияние паразитных проводимостей при различных значениях затуханий, т. е. какая в этом случае наблюдается связь между вещественной и мнимой составляющими коэффициента передачи четырехполюсника.

Известные методы анализа [1] устанавливают связь между фазовой и частотной характеристиками цепи путем составления эквивалентных схем и исследованием постоянных коэффициентов в уравнениях многополюсников общего вида. При этом получают сложные определители и проводят над ними громоздкие вычисления. Очевидно, что такой подход к анализу четырехполюсников может привести к неправильным выводам, так как структура схемы будет отличаться от реальной.

С другой стороны, для выяснения характера цепи достаточно путем эксперимента получить фазовую и частотную характеристики и на основании опытных данных, сравнивая закон их изменения, сделать соответствующий вывод.

Прежде чем исследовать симметричный магазин затухания, вначале рассмотрим идеальную минимально-фазовую цепь и для нее найдем выражение связи частотной погрешности с фазовой характеристикой.

Коэффициент передачи схемы рис. 1 равен:

$$K_{\omega} = \frac{r_2}{(r_1 + r_2) + i\omega\tau};$$

его аргумент:

$$\varphi_{\omega} = \operatorname{arctg} \frac{r_1}{r_1 + r_2} \omega \tau;$$

где  $\tau = cr_2$ ;

модуль коэффициента передачи имеет вид:

$$|K_{\omega}| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \frac{r_1^2}{(r_1 + r_2)^2} (\omega \tau)^2}}$$

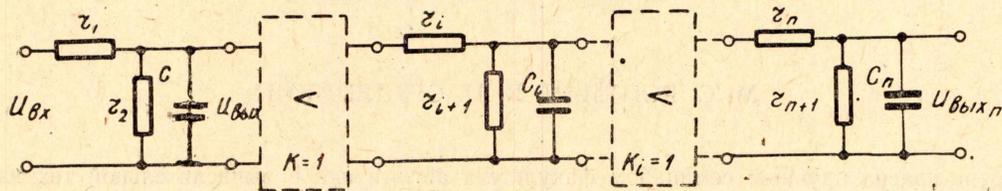


Рис. 1.

Если ввести величину  $m = \frac{r_1}{r_1 + r_2}$  в качестве масштабного коэффициента, то получим выражение для частотных искажений;

$$\frac{K_0}{K_{\omega}} = \sqrt{1 + (m\omega\tau)^2}.$$

Разложим правую часть полученного выражения в ряд и, пренебрегая членами высшего порядка, ограничиваясь только первыми двумя членами, получим

$$\frac{K_0}{K_{\omega}} \simeq 1 + \frac{(m\omega\tau)^2}{2}. \quad (1)$$

Коэффициент передачи четырехполюсника с учетом частотной погрешности равен

$$K_{\omega} = K_0 \pm \Delta K_{\omega}$$

или

$$\frac{K_0}{K_{\omega}} = 1 \pm \frac{\Delta K_{\omega}}{K_0}. \quad (2)$$

Введем обозначение относительной погрешности в (1) и (2) и найдем значение частотной погрешности и фазы для однозвенного идеального четырехполюсника:

$$\delta_{\omega} = \frac{(m\omega\tau)^2}{2}; \quad (3)$$

$$\varphi_{\omega} = \operatorname{arctg} \sqrt{2\delta_{\omega}}.$$

Для  $n$ -идентичных идеальных цепочек минимально-фазового сдвига, развязанных усилителями с коэффициентом передачи, равным единице, будем иметь

$$\delta_{\omega n} = \frac{n}{2} (m\omega\tau)^2; \quad (4)$$

$$\varphi_{\omega n} = n \operatorname{arctg} \sqrt{2\delta_{\omega n}};$$

из выражений (3) и (4) следует известный вывод, что для минимально-фазовых цепей фазовая характеристика идет значительно круче характеристики частотной погрешности.

Обозначим через  $\delta_0$  погрешность на частоте  $\omega_0$  и, используя соотношения (3), находим отношение нормированных частот, т. е.

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\delta_\omega}{\delta_0}},$$

тогда

$$\delta_\omega = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sqrt{\delta_0}; \quad (5)$$

$$\varphi_\omega = \arctg \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt[4]{4\delta_0}.$$

Отсюда следует, что фазовая характеристика для заданной погрешности изменяется по линейному закону, тогда как амплитудно-частотная характеристика имеет квадратичный характер.

Перейдем к рассмотрению скелетной схемы рис. 2, по которой проводилось измерение фазовых и частотных характеристик симметричных магазинов затухания. Как видно из приведенной схемы, напряжение с выхода генератора Г поступает на симметрирующий трансформатор  $Tr_1$  и неградуированный фазовращатель НФ, служащий для первоначального совмещения луча на экране электронного указателя равновесия ЭЛУР.

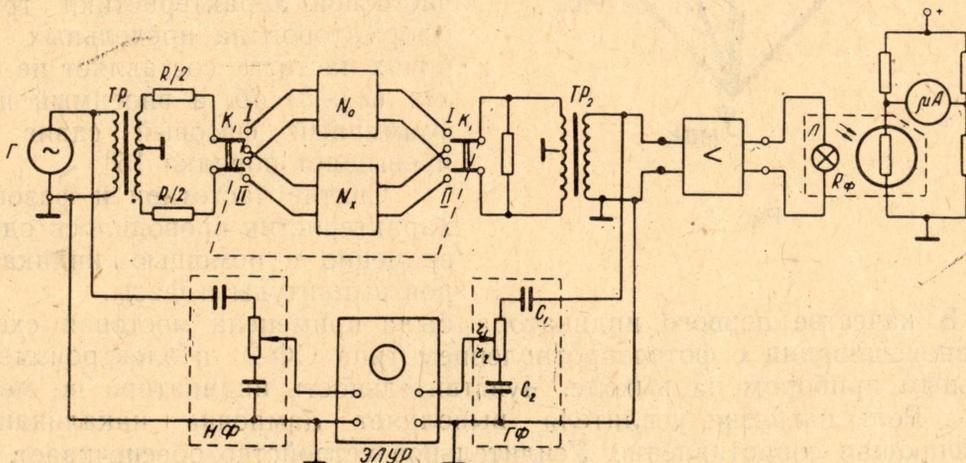


Рис. 2.

Сопротивление  $R$ , включенное во вторичную обмотку трансформатора, должно быть равно характеристическим сопротивлениям калиброванной секции  $N_0$  и испытываемому магазину затухания  $N_x$ . Сравнение величины коэффициента передачи четырехполюсников осуществляется при помощи двоянного ключа  $K_1$ .

Ослабленное напряжение на выходе четырехполюсника через второй симметрирующий трансформатор  $Tr_2$  подается на вход усилителя и параллельно ему включенный градуированный фазовращатель ГФ. Напряжение на выходе усилителя поступает на мостовую схему уравнивания, в одну из диагоналей которой включен чувствительный прибор.

В отличие от существующих схем [3] здесь использовался метод замещения с одними и теми же нагрузочными сопротивлениями и постоянным переходным затуханием для обоих проверяемых трактов.

Величина измеренного затухания сравнивается с показаниями калиброванных секций, частотная погрешность которых имеет заведомо известный закон распределения.

Калиброванные секции на фиксированное затухание использовались в качестве эталонных делителей. Для уменьшения электромагнитных связей в них предусматривается электростатическое экранирование. Частотная погрешность и фазовые сдвиги секций в рабочем диапазоне частот незначительные и ими можно пренебречь без заметной ошибки. Так, например, для секции с ослаблением ТРИ непера частотная погрешность на  $f_b = 600$  кгц равна 0,05% и соответственно фазовый сдвиг не более  $\varphi \leq 1^\circ 30'$ . Следовательно, калиброванные секции представляют собой

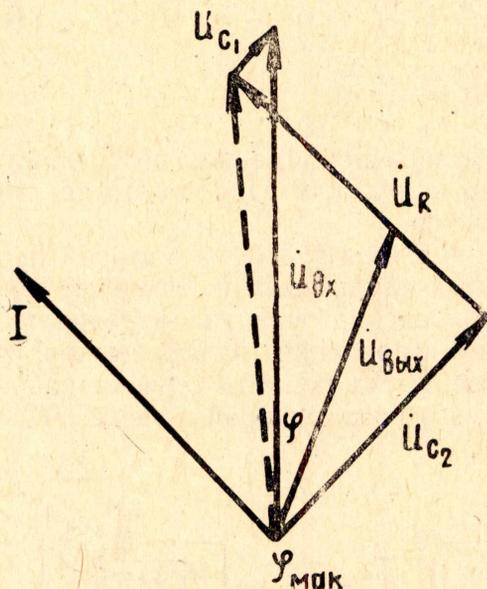


Рис. 3.

В качестве первого индикатора была применена мостовая схема уравнивания с фотосопротивлением типа СФ-2 и электроизмерительным прибором на выходе. Чувствительность индикатора не менее 0,3%. Роль нагрузки усилителя выполняет лампочка накаливания, освещающая сопротивление. Усилительное устройство обеспечивает необходимый уровень сигнала на нагрузке для различных значений затуханий поверяемого и образцового ослабителей.

Фазовые характеристики снимались методом интерференционных фигур с помощью двух фазовращателей и электронно-лучевого индикатора с чувствительностью не менее  $0,5 \frac{мм}{в}$  — при максимальном усилении каналов развертки осциллографа по осям  $x$  и  $y$ . Величина фазового угла подсчитывалась по следующей формуле:

$$\varphi_{\omega} = \arctg \frac{\omega c_2 (\tau_2 - \tau_1)}{\omega^2 \tau_2 (\tau_1 c_2 + \tau_2 c_1) + (c_1 + c_2)}, \quad (6)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  — постоянные времени переходных цепей градуированного фазовращателя.

Для магазина затухания фазовые сдвиги будут выражены как разность отсчетов, полученные на градуированном фазовращателе, т. е.

$$\varphi = \alpha_1 - \alpha_2,$$

чисто активные делители и являются эталонными звеньями в схеме поверки.

Метод замещения прост в измерении, дает высокую точность отсчета, позволяет не учитывать погрешности, вносимые трансформаторами, усилителями и другими вспомогательными элементами.

Симметрирование схемы поверки проводилось с помощью симметрирующих трансформаторов ТР1 и ТР2 с мультифилярной намоткой обмоток [4]. Завал частотной характеристики трансформаторов на предельных рабочих частотах составляет не более  $(2 \div 3)$  дб, а вносимый ими суммарный фазовый сдвиг не превышает порядка  $15^\circ$ .

Снятие частотной и фазовой характеристик проводилось одновременно с помощью индикаторов амплитуды и фазы.

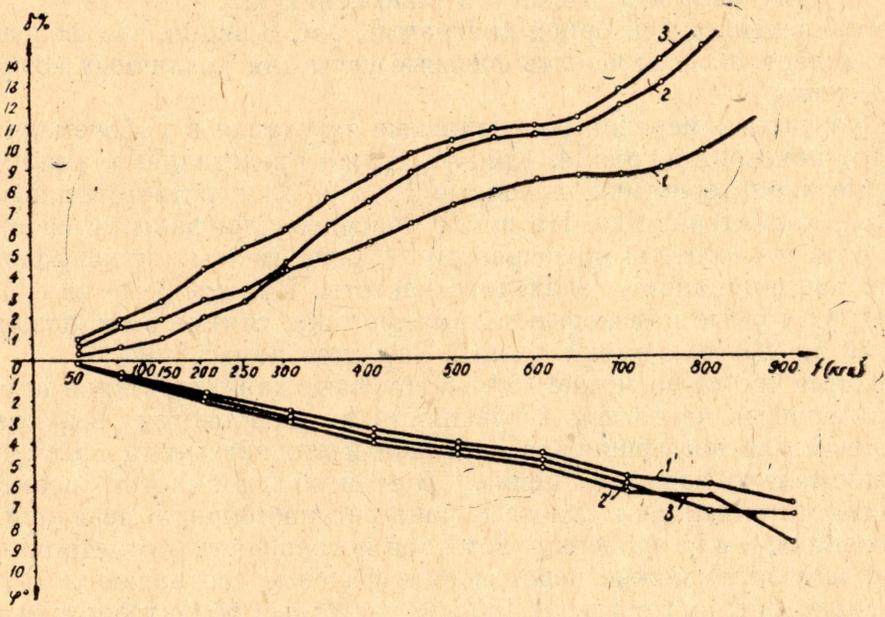


Рис. 4

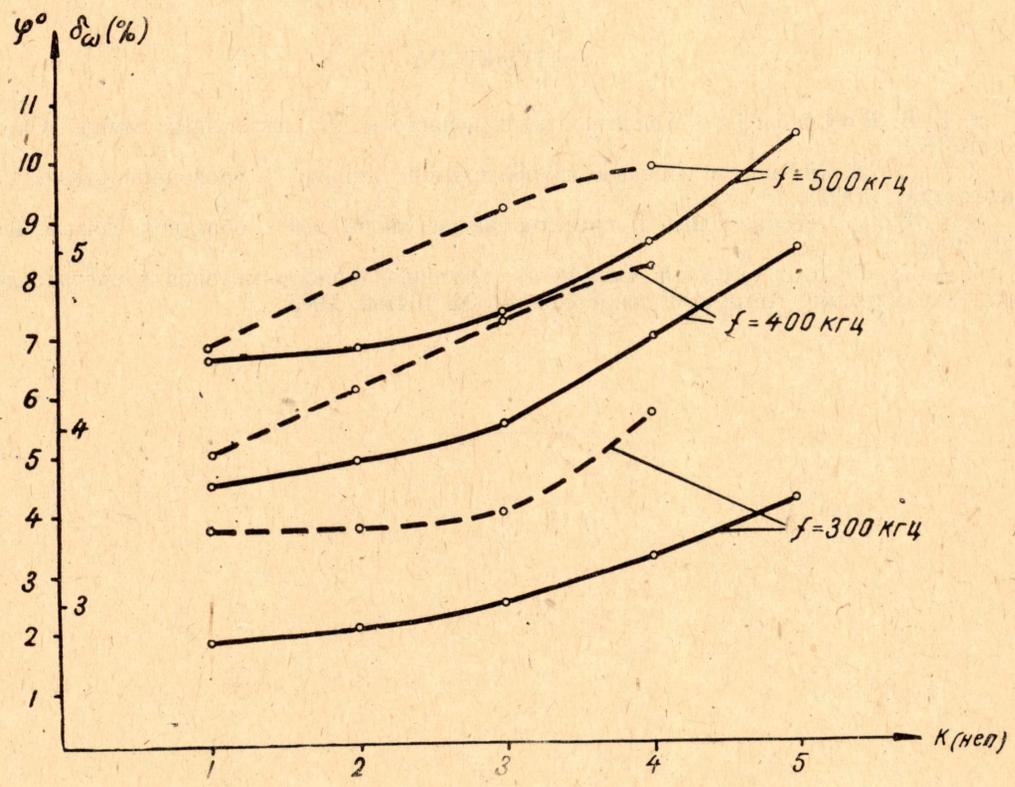


Рис. 5

где  $\alpha_1$  — значение сопротивления  $R$  для нулевых фазовых сдвигов вспомогательных элементов в положении переключателя П1;  
 $\alpha_2$  — значение сопротивления  $R$ , соответствующее также нулевому фазовому сдвигу в положении П2.

Из приведенной векторной диаграммы рис. 3 видно, что фазовращатель позволяет компенсировать фазовые углы для различных коэффициентов деления.

Результаты измерений на различные затухания в рабочем диапазоне частот показаны на рис. 4. Кривые 1, 2 и 3 представляют амплитудно-частотные характеристики, а кривые 1', 2' и 3' — соответственно фазо-частотные характеристики. На рис. 5 приведены графики изменения фазового угла и частотной погрешности в зависимости от коэффициента деления при постоянных значениях частоты. Как следует из графиков (рис. 4), частотные и фазовые характеристики, снятые в диапазоне частот от 50 до 900 кГц, имеют разный характер нарастания.

Так, для частот не свыше 150 кГц фазовые характеристики идут круче характеристик частотной погрешности и подчиняются выражениям, полученным для коэффициента передачи и его аргумента применительно к минимально-фазовым цепям. В этой области частот реактивные проводимости оказывают слабое влияние на постоянную передачи четырехполюсника, и для проверки частотной погрешности симметричных магазинов затухания можно использовать фазовые соотношения.

В диапазоне частот свыше 150 кГц частотные характеристики располагаются с большим углом наклона фазовых характеристик, т. е. магазин затухания по своим свойствам относится к неминимально-фазовым цепям.

Частотную погрешность четырехполюсника в этом диапазоне частот значительно проще оценить по частотной характеристике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Войшвилло. Усилители низкой частоты на электронных лампах. Связьиздат, 1959.
2. Н. Н. Соловьев. Основы измерительной техники в проводной связи. Госэнергоиздат, 1963.
3. Г. Боде. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. Изд. ИЛ., 1948.
4. А. Л. Грохольский. Способ изготовления трансформаторов с распределенными параметрами, Авторское свидетельство № 164892, 1962.