

Использование опции построения диаграмм Боде R&S RTM-K36 для измерения импеданса первичных преобразователей ультразвуковых расходомеров

Лемешко Н.В. (д.т.н., нач. отдела АО «Корпорация «Комета», nlem83@mail.ru), **Горелкин М.В.** (инженер по продукту «Осциллографы» ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», Mikhail.Gorelkin@rohde-schwarz.com), **Струнин П.А.** (директор департамента продаж ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

В статье рассматривается вопрос об использовании диаграмм Боде для измерений импеданса первичных преобразователей, используемых в ультразвуковых преобразователях. Дается представление о диаграммах Боде и основных областях их применения, а также принципах анализа свойств электрических цепей и систем автоматического управления. Представлена информация о функциональных особенностях опции R&S RTM-K36 осциллографов серии R&S RTM, предназначенной для построения диаграмм Боде для частот от 10 Гц до 25 МГц. Проанализированы свойства применяемых в расходомерах первичных ультразвуковых преобразователей как электронных компонентов, представлены схема измерений и расчётные соотношения для определения действительной и мнимой частей их импеданса в зависимости от частоты. Представлен пример выполнения таких измерений с применением опции R&S RTM-K36.

Введение

В настоящее время в радиоизмерениях особое внимание уделяется вопросам комплексности и достаточности получаемой информации о свойствах исследуемых объектов. Многие узлы электроники можно рассматривать как четырёхполюсники, причём их функциональность в конкретной схеме может быть полностью описана, например, во временной области переходной характеристикой, которая применяется для расчёта переходных процессов на основе интеграла Дюамеля [1]. Однако для большинства типов четырёхполюсников наиболее подходя-

щим для практических нужд описанием является частотная зависимость комплексного коэффициента передачи, которая включает в себя одновременно их амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики (АЧХ, ФЧХ). Наиболее подходящими они являются для усилителей, фильтров, а также аналоговых регуляторов тембра и систем автоматического управления с непрерывными переменными. Такие зависимости, представленные в логарифмическом масштабе по амплитуде и частоте и иногда совмещённые при помощи единой оси частот, принято называть диаграммой Боде [2].

Для детального экспериментального исследования свойств многополюсников рынок средств измерений предлагает специальные приборы – векторные анализаторы цепей (ВАЦ) [3], предназначенные для измерений частотной зависимости параметров, посредством которых могут быть связаны входные, выходные и отражённые высокочастотные сигналы. В большинстве своём при таких измерениях для ряда частот оцениваются S-параметры, характеризующие передачу сигналов через многополюсник в обе стороны. Такие приборы обычно применяются на частотах выше 1 ГГц, являются специализированными и дорогостоящими средствами измерений. Флагманские векторные анализаторы цепей серии R&S ZVA охватывают диапазон частот от 300 кГц до 60 ГГц, а приборы R&S ZNB4 функционируют, начиная с частоты 9 кГц [3], и, таким образом, охватывают даже часть звукового диапазона.

На практике применение ВАЦ в низкочастотных приложениях обычно оказывается избыточным. Действительно, большая часть перечисленных выше функциональных узлов характеризуется односторонней передачей сигналов, поэтому обратные коэффициенты передачи практически теряют первоначальный смысл. Параметры S_{ip} характеризующие отражение энергии от портов многополюсника, также обычно не используются для низкочастотных устройств, равно как и диаграммы Вольперта – Смита [4]. Ввиду этого для экспериментального определения АЧХ и ФЧХ здесь следует использовать иную номенклатуру приборов.

С учётом широкого распространения технологии прямого цифрового синтеза сигналов [5] генерирующие блоки, необходимые для построения диаграмм Боде, могут быть реализованы в составе других устройств, включая осциллографы. Такое решение реализо-

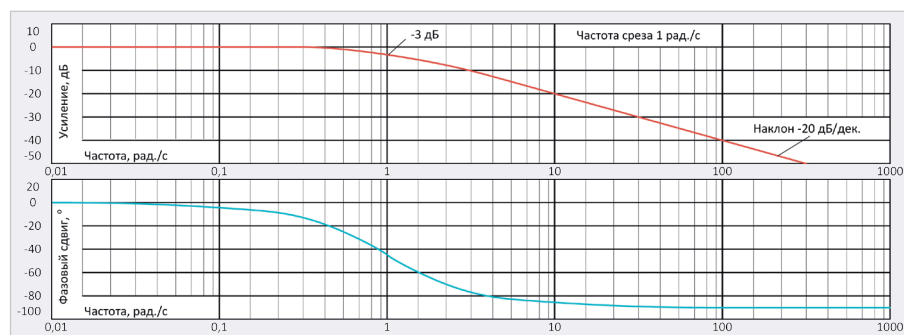


Рис. 1. Диаграмма Боде для фильтра нижних частот первого порядка при $f_0 = 1/(2\pi)$

вано в осциллографях серии RTM компании Rohde&Schwarz в форме опции R&S RTM-K36, которая предназначена для автоматизированного построения диаграмм Бode в частотном диапазоне от 10 Гц до 25 МГц и соответствующим образом управляет встроенным генератором R&S RTM-B6.

Представление о диаграммах Бode и области их применения

Как отмечалось выше, при построении диаграмм Бode используется логарифмический масштаб по частоте и амплитуде, поэтому второе их название – логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ). Для оси частот обычно используют декадный масштаб, октавные единицы применяют только для акустических приложений, например, когда измерения проводятся для фильтров, предназначенных для психометрических измерений [6]. При построении АЧХ по оси ординат используют шкалу в децибелах, а для ФЧХ применяют линейные единицы – градусы ($-180...180^\circ$) либо радианы ($-\pi... \pi$). На рис. 1 представлен пример ЛАФЧХ для фильтра нижних частот первого порядка в виде RC-цепи, передаточная функция которого описывается уравнением $K(j\omega) = 1 / (1 + j\omega RC)$, где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, рад/с, f – частота, Гц, причём $f_0 = 1 / (2\pi RC)$ – частота среза (см. рис. 1).

Для практических целей, таких как синтез электрических цепей и схем автоматического управления [7], кривые ЛАФЧХ аппроксимируют прямыми линиями. Далее требуемые для ряда частот значения амплитуд и фаз распределяют между узлами схемы таким образом, чтобы они в совокупности давали наиболее близкое к заданному изменение амплитуд и фаз. Действительно, если для частот f_k в количестве M требуется получить некоторые значения АЧХ A_k и ФЧХ φ_k , то при декомпозиции, реализующей такое преобразование схемы на M последовательно соединённых узлов, необходимо потребовать для каждой частоты весьма точного выполнения условий

$$A_k = \prod_{m=1}^M A_{k,m}, \quad \varphi_k = \sum_{m=1}^M \varphi_{k,m},$$

где $A_{k,m}$ и $\varphi_{k,m}$ – коэффициент передачи по амплитуде и фазовый сдвиг узла m на частоте k . Переход к логарифмическому масштабу позволяет перейти от умножения к сложению амплитудных характеристик в децибелах, что значи-

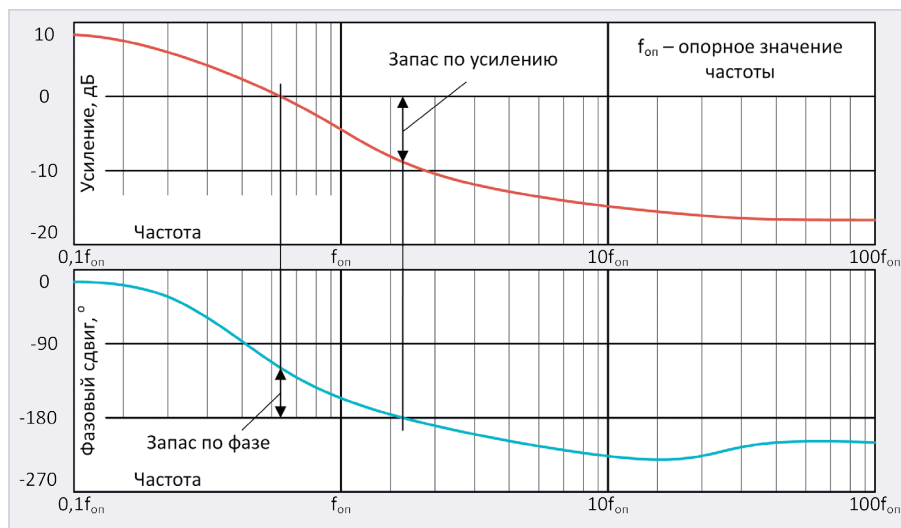


Рис. 2. Определение запаса по фазе и по усилению для систем автоматического управления с обратной связью

тельно упрощает расчёты. Для оптимизации приближения АЧХ и ФЧХ к требуемым формам могут быть использованы регрессионные методы [8].

Аналогичный подход может быть реализован, если передаточная функция $H(s)$ некоторой цепи представлена в операторной области в виде дробно-рациональной функции вида

$$H(s) = A \left(\prod_{i=1}^l (s + x_i)^{a_i} \right) \left(\prod_{j=1}^m (s + y_j)^{-b_j} \right),$$

где A , x_i , y_j , a_i , b_j – постоянные коэффициенты. Существуют специальные правила [7], которые позволяют строить аппроксимированные прямыми линиями ЛАФЧХ по расположению нулей и полюсов передаточной функции.

Область применения диаграмм Бode охватывает:

- анализ и синтез схем усилителей, фильтров и других линейных стационарных систем, в том числе с применением средств автоматизации проектирования;
- анализ устойчивости систем с обратной связью, включая схемы автоматического управления;
- определение типов элементарных передаточных звеньев по форме ЛАФЧХ при анализе систем типа «чёрный ящик».

При использовании диаграмм Бode для анализа устойчивости систем с обратной связью по ним определяется запас по фазе и по усилению. По сути, почти все частотные критерии устойчивости, выработанные в теории автоматического управления, основаны на недопущении превращения имеющейся отрицательной обратной связи в положительную с усилением. Иначе в системе возникнет возбуждение, и она

перестанет правильно выполнять свои функции. Это относится как к механическим, так и к электрическим системам. Для определения запасов по фазе и усилению для разомкнутой системы автоматического управления строят диаграмму Бode и далее определяют названные характеристики так, как показано на рис. 2. При этом исходят из аксиомы о том, что система теряет устойчивость тогда, когда усиление в цепи обратной связи выше 0 дБ и одновременно значение фазового сдвига по модулю превышает 180° .

Для определения типов элементарных звеньев, например, системы автоматического управления, экспериментально построенные ЛАФЧХ соотносят с идеальными [2]. Так, например, пропорциональное звено имеет нулевой фазовый сдвиг в заданной полосе частот, в то время как для идеального интегрирующего звена он равен -90° при наклоне АЧХ -20 дБ/дек. АЧХ колебательного звена имеет характерный резонансный максимум, а значение фазового сдвига может составлять 0° или 90° в зависимости от точек подключения нагрузки. ЛАЧХ звена чистого запаздывания, как и любой замедляющей системы без потерь [9], характеризуется нарастанием фазы по степенному закону, в то время как при линейном масштабе по частоте он меняется строго линейно. Если такой анализ даёт противоречивые результаты, то звено следует считать состоящим из двух и более элементарных звеньев, пытаясь разделить изменение АЧХ и ФЧХ между ними с изменением частоты так, как это было описано выше.



Рис. 3. Схема измерений импеданса УПП с использованием опции R&S RTM-K36

Рассматриваемым ниже примером несколько необычного применения диаграмм Боде является определение ЛАФЧХ для первичных преобразователей промышленного назначения, в частности, применяемых в ультразвуковых расходомерах [10], для определения зависимости их импеданса от частоты. Это необходимо для наиболее точного согласования таких устройств с источником импульсного сигнала и для оптимизации условий передачи мощности в такую нагрузку. Для этого, а также для ряда других промышленных применений, связанных с эксплуатацией резистивных, пьезоэлектрических, электромеханических и других преобразователей, использование опции R&S RTM-K36 является одним из лучших вариантов как по удобству, так и по затратам времени.

Функциональные особенности опции R&S RTM-K36

Опция R&S RTM-K36, реализуемая на базе осциллографов серии R&S RTM, специально предназначена для построения диаграмм Боде. При этом тестовый синусоидальный сигнал с переменной частотой снимается с выхода встроенного генератора R&S RTM-B6 и подаётся посредством внешнего соединения на один вход осциллографа, а выходной сигнал исследуемого четырёхполюсника – на второй вход, конфигурируемые в настройках опции. Диаграмма Боде может строиться однократно или с постоянным обновлением для интервала частот от 10 Гц до 25 МГц и представляется в единой координатной плоскости с двумя осями ординат, соответствующих АЧХ и ФЧХ.

Как это видно на рис. 7, окно построения диаграмм Боде разделено на несколько сегментов. В верхней части окна имеется строка, в которой пока-

заны значения основных настроек построения диаграммы Боде, к которым относятся начальная и конечная частоты, количество точек на декаду частоты, состояние встроенного генератора, а также значение амплитуды его выходного сигнала. Количество точек на декаду частоты может меняться от 10 до 500 шт. [11].

Важной особенностью опции является возможность задания амплитудного профиля: разных значений амплитуды выходного сигнала генератора, что необходимо для цепей с ограниченным динамическим диапазоном, например, для усилителей класса А. Если функция амплитудного профиля активирована, то он задаётся по точкам и отображается в виде ломаной линии на диаграмме Боде. Сам амплитудный профиль при этом может быть задан установкой опорных точек при помощи сенсорного экрана. В типовом случае уровни тестового напряжения фиксируются постоянными в пределах декады. Уровень тестового сигнала выбирается в интервале от 20 мВп-п до 10 Вп-п для четырёхполюсников с большим входным сопротивлением и в два раза меньше, если оно равно 50 Ом.

Ниже строки настроек расположено окно для отображения диаграммы Боде. Изменение амплитуды и фазы сигнала при прохождении через исследуемую цепь отображается в децибелах и градусах, к обеим кривым применимы курсорные измерения, результаты которых отображаются в левой нижней части экрана. Под диаграммой Боде расположено табличное представление результатов измерений по каждой частотной точке. В левой нижней части экрана (см. рис. 7) расположена область для управления процессом измерений. Здесь отображаются обозначения каналов осциллографа, назначенные для входного и выходного сигналов четырёхполюсника, кнопки запуска, остановки измерений и обновления диаграммы Боде, а также кнопка, открывающая окно установки настроек измерений.

В окне установки настроек измерений для генератора R&S RTM-B6 может быть выбран тип нагрузки (high-Z или 50 Ом), задано количество точек на декаду, включено или отключено применение амплитудного профиля, задано максимальное значение для фазового угла. Кроме того, здесь устанавливается значение задержки измерений, соответствующее времени, кото-

рое будет проходить между моментом перехода на следующую частоту и осуществлением измерений. Такая задержка позволяет дождаться завершения переходных процессов в объекте исследования, вызванных перестройкой по частоте. Процесс измерений полностью автоматизирован, результаты могут быть экспортированы в файлы формата *.CSV, что было использовано в экспериментальной части работы для выполнения математической обработки.

Особенности ультразвуковых первичных преобразователей как объекта радиоизмерений и подход к определению их импеданса

Ультразвуковые первичные преобразователи (УПП), предназначенные для использования в расходомерах, обычно состоят из двух одинаковых устройств. Каждое из них включает в себя пьезоэлемент, который способен на основе внешнего сигнала формировать колебания ультразвукового диапазона, а также формировать выходной сигнал по таким колебаниям. Существует большое количество конструкций УПП, но наибольшее распространение получили датчики, установка которых не требует изменения профиля трубопровода и осуществляется при помощи специальных направляющих снаружи труб круглого сечения, что значительно упрощает монтаж и наладку ультразвуковых расходомеров [10, 12].

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на том, что звуковые волны имеют разную скорость распространения по ходу и против хода рабочего вещества в трубопроводе. По этой разнице и на основе известного сечения трубопровода, а также характеристик плотности и вязкости вещества и осуществляется измерение расхода. Принципиально все методы, основанные на таком принципе, разделяются на фазовые, частотные и времяимпульсные. В первом случае используются сигналы мегагерцового диапазона с совпадающими или близкими частотами, в типовом случае они составляют около 6 МГц. При реализации частотного метода измерительная система автоматически подбирает такие частоты, чтобы на длине измерительного канала при распространении ультразвука в обоих направлениях укладывалось целое число полувольт. Тогда расход рабочего вещества оказывается пропорциональ-

ным разности этих частот. Наконец, времяимпульсный метод основан на применении интегрирующих схем постоянного напряжения, для которых время интегрирования пропорционально задержке распространения ультразвука в среде, передаваемой в трубопроводе.

Функциональность каждой из частей УПП состоит в излучении ультразвуковых импульсов в месте установки и их регистрации, когда импульсы формируются другим УПП. Требование по точности и надёжности работы ультразвуковых расходомеров устанавливает необходимость однозначного распознавания таких импульсов на фоне механических вибраций, акустического шума и других воздействий, почти всегда присутствующих в промышленных условиях. Как отмечается в [6], устройства на основе пьезоэффекта чаще всего представляют собой ёмкостную нагрузку, т.е. реактивная часть их сопротивления отрицательна. На практике конструкция УПП обычно предусматривает использование ряда пьезоэлементов с последовательно-параллельным соединением, что повышает эффективность излучения ультразвуковых волн, чувствительность при их приёме и нагрузочную способность. Наличие дополнительных соединений внутри УПП, а также штатного кабеля для подключения к расходомеру делает неопределённым характер импеданса такой составной нагрузки. Для наиболее эффективного использования выходной мощности импульсного генератора, питающего УПП, требуется предпринять меры по их согласованию по импедансу. Сходная картина возникает на приёмной стороне.

Диаграмма Боде может быть построена для четырёх- либо трёхполосника. Между тем УПП являются несимметричным двухполосным устройством, ввиду чего результаты измерений АЧХ и ФЧХ непосредственно с импедансом соотносить невозможно. Однако диаграмма Боде всё же может использоваться в качестве исходных данных для расчёта импеданса, если применить схему измерений, показанную на рис. 3, в которой для определённости указан использовавшийся в экспериментальной части работы тип осциллографа – R&S RTM3004. При оценке зависимости импеданса УПП от частоты $Z(f)$ с её использованием следует учитывать входное сопротивление осциллографического канала R_{01} и его ёмкость C_{01} ,

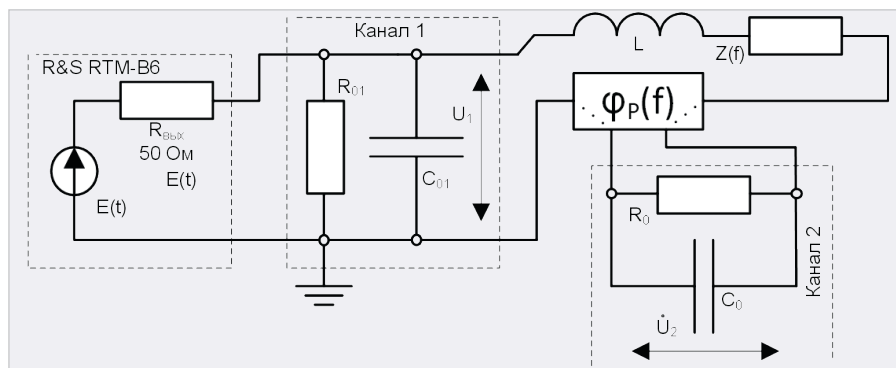


Рис. 4. Схема замещения

аналогичные суммарные параметры R_0 и C_0 для канала осциллографа и пробника при его подключении ко второму каналу, а также фазовый набег $\varphi_p(f)$, вызванный задержкой распространения сигнала в кабеле пробника, если перед измерениями не была выполнена её компенсация.

Вопрос о компенсации фазового набега пока оставим в стороне, подробно его необходимость и способ осуществления освещены в экспериментальной части статьи. Для схемы измерений на рис. 3 справедлива схема замещения (на рис. 4), исходя из которой может быть рассчитана функция $Z(f)$ для УПП вместе с фрагментом коаксиального кабеля до проводной врезки. Схема построена в предположении, что участок кабеля от тройника до проводной врезки имеет малую длину. Звено $\varphi_p(f)$ вносит только задержку и пока учитываться не будет. Для осциллографов серии R&S RTM активное сопротивление осциллографического канала $R_{01} = 1$ МОм, ёмкость $C_{01} = 14$ пФ, они выдерживаются с погрешностью не выше $\pm 1\%$ и ± 1 пФ соответственно [11].

При построении диаграммы Боде при использовании схемы на рис. 3 опция R&S RTM-K36 в виде функций частоты f рассчитывает отношение амплитуд напряжений $A(f)$ на входах 2 и 1 осциллографа и разность фаз между ними $\varphi(f)$, причём отрицательное значение фазы соответствует запаздыванию напряжения в канале 2. Пусть импеданс УПП $Z(f)$ складывается из действительной и мнимой составляющей, т.е. $Z(f) = R(f) + jX(f)$, где $j = \sqrt{-1}$. Выходное сопротивление генератора R&S RTM-B6 составляет 50 Ом [11], что значительно меньше входного сопротивления осциллографического канала R_0 . Фаза $\varphi(f)$ рассчитывается относительно сигнала в первом канале, принятом за опорный, причём в случае запаздывания $\varphi(f) > 0$, если оно составляет менее

четверти периода. Исходя из этого, если теперь для некоторой частоты принять амплитуды сигналов на входах 1 и 2 осциллографа равными U_1 и U_2 , то $U_2 = U_1 A(f) \exp(j\varphi(f))$. В схеме замещения на рис. 4 имеется индуктивность L , которая моделирует одновитковую индуктивность, образованную элементами пробника. Исходя из конфигурации схемы замещения, наличием элементов R_{01} и C_{01} для канала 1 можно пренебречь. Учитывая, что полный импеданс исследуемой цепи много больше, чем выходное сопротивление генератора $R_{вых}$, с точностью до фазового сдвига имеем:

$$U_2 = U_1 \left(R_0 \parallel \frac{1}{j2\pi f C_0} \right) / \left(R_0 \parallel \frac{1}{j2\pi f C_0} + Z(f) + j2\pi f L \right) \quad (1)$$

В уравнении (1)

$$R_0 \parallel \frac{1}{j2\pi f C_0} = \frac{R_0}{1 + j2\pi f C_0 R_0}$$

После преобразований получим:

$$Z(f) = \frac{R_0}{A(f) \exp(j\varphi(f))(1 + j2\pi f C_0 R_0)} - \frac{R_0}{1 + j2\pi f C_0 R_0} - j2\pi f L \quad (2)$$

Действительная и мнимая части $Z(f)$, рассчитанные для ряда частотных точек, дадут зависимости $R(f)$ и $X(f)$. При этом при учёте набега фазы $\varphi_p(f)$ необходимо определённым образом скорректировать измеренную ЛФЧХ так, как показано в экспериментальной части работы.

Пример использования опции R&S RTM-K36

Объекты исследования и схемы измерений

В качестве объектов исследований были выбраны:

- аттенуатор JEW 50FNB-020-10-N с предельной рассеиваемой мощностью 10 Вт, номинальным ослаблением 20 дБ и полосой рабочих частот до 2 ГГц [14];

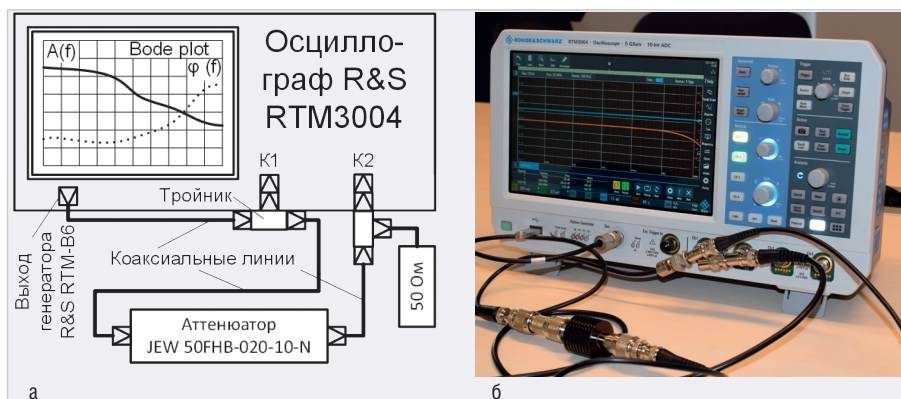


Рис. 5. Измерительная установка для построения диаграммы Бode для аттенюатора: схема (а) и фотография (б)

● УПП из состава расходомера «Акрон-1».

Для аттенюатора диаграмма Бode как таковая является итоговым результатом измерений. При измерениях использовалась схема, показанная на рис. 5а. Она включала осциллограф R&S RTM3004 с четырьмя каналами и полосой рабочих частот 1 ГГц и с опцией R&S RTM-K36. Сигналы передавались в коаксиальных трактах, на выход аттенюатора для согласования была установлена нагрузка номиналом 50 Ом. В настройках опции R&S RTM-K36 было указано, что генератор R&S RTM-B6 работал с нагрузкой 50 Ом. В использовавшейся схеме измерений диаграмма Бode строилась для аттенюатора вместе с подключёнными к нему коаксиальными кабелями, в выбранной полосе частот такое соединение характеризуется постоянством задержки распространения сигналов. Фотография измерительной установки приведена на рис. 5б.

При измерениях частотной зависимости импеданса УПП использовалась схема, показанная на рис. 3, в которой применялся пробник PP016. Как и многие другие пробники, он имеет встро-

енный делитель напряжения. При работе с коэффициентами деления 1:1 и 1:10 полоса его рабочих частот составляет 10 и 300 МГц [15]. Ввиду того, что построение диаграммы Бode для УПП представляет особый интерес на частотах выше 15 МГц, на нём был установлен коэффициент деления 1:10, и тогда по информации из технической документации $R_0 = 10 \text{ МОм}$, а ёмкости осциллографического канала $C_{01} = 14 \text{ пФ}$ добавляется ещё 12 пФ, откуда имеем $C_0 = 26 \text{ пФ}$. Перед использованием пробник был компенсирован встроенными средствами регулировки в соответствии с рекомендациями [15] с использованием прямоугольных импульсов с частотой 10 кГц. Фотография измерительной установки приведена на рис. 6, генератор R&S RTM-B6 в ней работал в режиме нагрузки с высоким сопротивлением.

Результаты измерений, полученные для аттенюатора JEW 50FHB-020-10-N, показаны на рис. 7. При построении диаграммы Бode в интервале частот от 10 Гц до 25 МГц использовалось напряжение с амплитудой 5 Вп-п, расчёт амплитуд и фаз выполнялся в ста точках в пределах каждой



Рис. 6. Фотография измерительной установки для построения диаграммы Бode в целях расчёта функции $Z(f)$

декады. В левой нижней части окна показаны результаты курсорных измерений. Для частот 2 кГц и 25 МГц на графики ЛАЧХ и ЛФЧХ установлены маркеры. Как видим, ослабление между этими частотами почти постоянно и находится вблизи номинального значения -20 дБ , что вполне соответствует ожиданиям. Для каждой из указанных частот опция R&S RTM-K36 рассчитала фазовый сдвиг сигналов между вторым и первым каналом осциллографа, которые равны $-0,07^\circ$ и $-101,53^\circ$, или $-3,9 \times 10^{-4}$ и $-0,56 \text{ рад}$. На основе измеренных значений фазового сдвига $\Delta\phi$ для исследуемой цепи может быть найдена задержка распространения сигналов для указанных частот f по формуле $\Delta t = -\phi / (2\pi f)$, расчётные значения которых для частот 2 кГц и 25 МГц составляют соответственно 33 и 35 нс, т.е. практически совпадают. Постоянство задержки характерно для трактов, не проявляющих значительных дисперсионных свойств в рассматриваемой полосе частот [4]. Как следует из полученных результатов, в высокочастотной части диапазона построения диаграммы Бode измерительная оснастка, включая кабели и пробники, способна проявлять собственные свойства, которые, как будет показано ниже, могут приводить к весьма противоре-



Рис. 7. Результат построения диаграммы Бode для аттенюатора



Рис. 8. Диаграмма Бode, построенная с использованием схемы измерений на рис. 3

чивым результатам в отсутствие компенсации фазового сдвига.

Результаты оценки импеданса для УШП. Диаграмма Бode, построенная с использованием схемы на рис. 3, представлена на рис. 8 и включает 500 точек на декаду. Она построена для интервала частот от 1 до 25 МГц. Размах тестового синусоидального сигнала составлял 5 Вп-п. Согласно полученным результатам, на частоте 19,3 МГц происходит переход фазы через значение -180° , и это сопровождается наблюдаемым усилением входного сигнала на 0,4 дБ. С точки зрения теории систем автоматического регулирования это означает, что в исследуемой системе запас по фазе и усилению отрицателен, и она должна была бы потерять устойчивость. Напряжение на входе канала 2 осциллографа должно было бы установиться в одном из крайних значений.

Для дальнейшей обработки диаграмма Бode была сохранена в формате *.CSV. Фазовая характеристика $\varphi^*(f)$, полученная непосредственно при измерениях, повторена точечной кривой на рис. 9. Непосредственная подстановка результатов измерений в формулу (2) даёт зависимости $R^*(f)$ и $X^*(f)$, показанные такими же кривыми на рис. 10 и 11. Плоская петля, образованная проводящими элементами пробника, имеет расчётную индуктивность $L = 5$ мкГн. Значение получено с использованием справочника [16].

Как видно на рис. 9, функция $R^*(f)$ после частоты 19,3 МГц приобретает отрицательные значения. Вместе с тем в теории электрических цепей показано [1], что для любого пассивного двухполюсника активная часть сопротивления всегда будет положительной. Свойства двухполюсников с отрицательным активным сопротивлением дополнительно рассмотрены в работе [17]. Как мы видим, полученные результаты измерений противоречат базовым положениям теории электрических цепей. Именно отсюда возникает необходимость учёта фазового набега $\varphi_p(f)$, определяемого пробником PP016.

Разность времени прихода сигналов при использовании двух и более пробников имеет критическое значение в некоторых приложениях, например, для измерения фазового угла с использованием пробников тока и напряжения, например, при работе опции R&S RT-K31. В этом случае для миними-

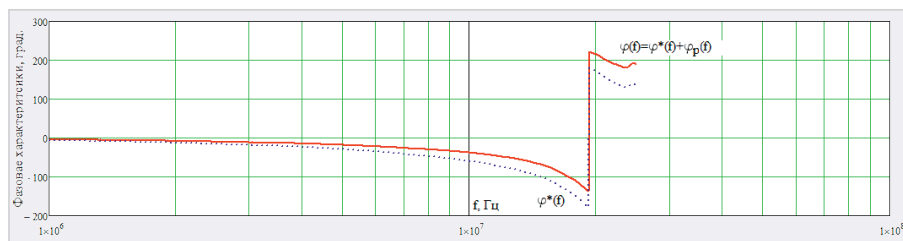


Рис. 9. Измеренная и скорректированная ЛФЧХ

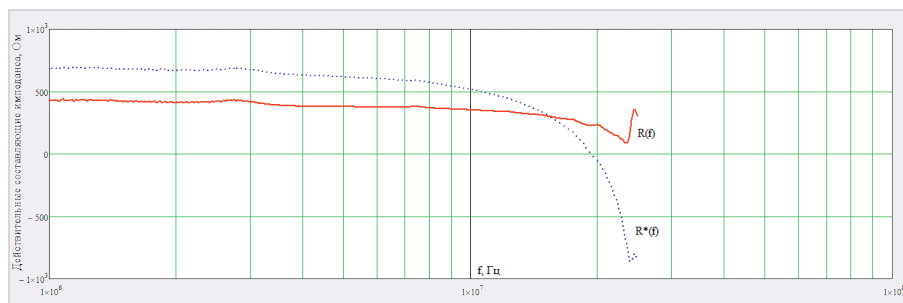


Рис. 10. Расчётные зависимости $R^*(f)$ и $R(f)$

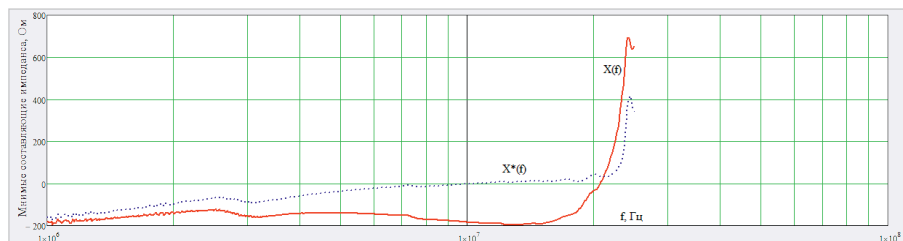


Рис. 11. Расчётные зависимости $X^*(f)$ и $X(f)$

зации фазового сдвига между пробниками используется специальная плата R&S RT-ZF20. В схеме на рис. 3 используется только один пробник, и здесь целесообразно выполнить расчётную оценку функции $\varphi_p(f)$ на основе особенностей его конструкции.

Пробник комплектуется кабелем длиной 1,2 м, а общая длина, проходимая измеряемым сигналом в коаксиальном тракте пробника, составляет $l = 1,3$ м. На основе анализа таблицы П4.2 справочника [18] можно установить, что для кабелей, не относящихся к классу фазостабильных, коэффициент укорочения длины волны составляет $k = 1,52$. Тогда сама функция $\varphi_p(f)$ приобретает вид $\varphi_p(f) = 2\pi lfk/c$, где $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Функция $\varphi(f) = \varphi^*(f) + \varphi_p(f)$ показана на рис. 9 сплошной кривой с учётом пересчёта радиан в градусы.

При использовании в расчётах скорректированной ЛФЧХ всё встаёт на свои места. На рис. 10 и 11 сплошными кривыми показаны графики функций $R(f)$ и $X(f)$, отражающие окончательные результаты оценки действительной и мнимой составляющих импеданса. Описанный пример позволяет ещё раз

подчеркнуть важность осуществления фазовой коррекции и отслеживания любых факторов, которые способны приводить к существенным фазовым сдвигам.

Заключение

Таким образом, несмотря на развитие средств измерений и методов определения частотных характеристик четырёхполюсников, диаграммы Бode были и остаются одним из самых наглядных способов представления такой информации. Аналогичный результат в части построения диаграмм Бode даёт использование генераторов и осциллографов как отдельных приборов, но в опции R&S RTM-K36 такая функциональность реализована в одном устройстве и не требует, например, подготовки программ для управления приборами при измерениях. Нельзя также не отметить, что функции генератора R&S RTM-B6 не ограничиваются формированием только синусоидального сигнала – методы прямого цифрового синтеза позволяют сформировать сигналы любой формы в пределах аппаратных ограничений.

Литература

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. В 3 ч. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
2. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика // URL: <https://ru.wikipedia.org>.
3. URL: <http://www.rohde-schwarz.com> (дата обращения: 16.05.2021).
4. *Дансмор Д.П.* Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей // Серия книг «Мир электроники». – М.: Техносфера, 2018. – 753 с.
5. *Брюханов Ю.А., Пиоров А.Л., Джиган В.И. и др.* Основы цифровой обработки сигналов. – Ярославль: ЯрГУ, 2013. – 344 с.
6. *Левшина Е.С., Новицкий П.В.* Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
7. *Воронов А.А.* Элементы теории автоматического регулирования. – М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1954. – 470 с.
8. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1974. – 832 с.
9. *Силин Р.А., Сазонов В.П.* Замедляющие системы. – М.: Советское радио, 1966. – 632 с.
10. URL: <https://eno-tek.ru/blog/teplo-blog/ultrasonic-method> (дата обращения: 19.05.2021).
11. R&S RTM3000 Oscilloscope. Specification. – 5214.9144.22 11.00 PDP/PDW 1 en. – 32 p.
12. URL: <https://www.kipiavp.ru/pribori/ultrazvukovoy-rashodomer.html> (дата обращения: 19.05.2021).
13. Расходомер ультразвуковой с накладными излучателями АКРОН-01. Руководство по эксплуатации АЦПР.407154.011 РЭ // URL: <http://www.signur.ru> (дата обращения: 20.05.2021).
14. URL: <https://www.rfparts.com/50fhhb-020-10-n.html> (дата обращения: 05.09.2021).
15. Passive Probe LeCroy PP016. Instruction Manual. – Revision A. – 12.2008.
16. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
17. *Лемешко Н.В.* Отрицательное активное сопротивление и перспективы его применения в радиоэлектронике // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств. Сб. науч. трудов / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2009. – С. 33–43.
18. *Ефимов И.Е., Останькович Г.А.* Радиочастотные линии передачи. – М.: Связь, 1977. – 408 с.



НОВОСТИ МИРА

УТВЕРЖДЕНЫ ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СУБСИДИЙ КОМПАНИЯМ НА ВНЕДРЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

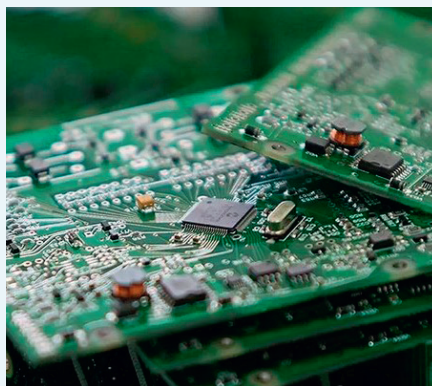
Председатель правительства Михаил Мишустин утвердил правила предоставления субсидий из федерального бюджета российским компаниям на финансовое обеспечение части затрат, связанных с внедрением российской продукции радиоэлектронной промышленности; соответствующее постановление от 27 сентября 2021 года № 1619 опубликовано на сайте правительства.

Как следует из документа, «внедрение российской продукции радиоэлектронной промышленности» – это «комплекс мероприятий, направленных на использование российской продукции радиоэлектронной промышленности в конечной продукции российских компаний, и (или) оказание услуг потребителям с использованием такой продукции, и (или) ведение прочей хозяйственной деятельности с использованием такой продукции».

«Российская продукция радиоэлектронной промышленности» определяется как радиоэлектронная продукция, включённая в единый реестр российской радиоэлектронной продукции.

Субсидии – до 4 миллиардов рублей в год – будут предоставляться на проекты внедрения российской продукции, которые планируется реализовать в ближайшие пять лет. При этом сама компания должна вложить

в проект не менее 100 миллионов рублей за весь период. Кроме того, организация должна взять на себя обязательство, что доля российской электроники в общем объёме проекта по итогам его реализации составит не менее 70%.



За счёт федеральных субсидий компании смогут возместить до 50% затрат. Деньги, в частности, разрешается направить на приобретение продукции и комплектующих, необходимых для её внедрения, модернизацию производства, переобучение сотрудников.

На господдержку могут претендовать проекты, которые одобрены и утверждены правительственной комиссией по цифровому развитию. Сбором заявок на получение субсидии и заключением соответствующих соглашений займётся Минпромторг.

Напомним, ранее правительство утвердило правила предоставления субсидий производителям радиоэлектроники.

РЕЕСТР РОССИЙСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И БАЛЛЬНАЯ СИСТЕМА

Планы Минпромторга в отношении использования Единого реестра российской радиоэлектронной продукции предусматривают введение оценки устройств, вошедших в реестр, в условных баллах, показывающих предпочтительность с точки зрения импортозамещения. Баллы начисляются за выполнение каждого из требований, предъявляемых к продукции.

В конце июня министерство опубликовало для общественного обсуждения проект постановления правительства, вносящего изменения в приложение к постановлению Правительства РФ от 17 июля 2015 г. № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации». В документе описывается предложенная Минпромторгом «балльная система» для компьютеров, ноутбуков, сенсоров, печатных плат, микроконтроллеров и т.д. При этом отменяется обязательность использования отечественного процессора для попадания в перечень российской продукции.

В августе Минпромторг представил проект постановления правительства, предполагающего распространение «балльной системы» для вхождения в реестр отечественной электронной продукции на отдельные виды электронного оборудования в автомобилях.

Против введения такой системы выступают отдельные компании, эксперты, Консорциум отечественных разработчиков систем хранения данных «РосСХД».

d-russia.ru

Комплексное оснащение испытательных лабораторий по ЭМС

от мирового лидера по производству измерительного оборудования*

*Измерительное оборудование и антенны включены в Государственный реестр средств измерений



Хотите узнать подробности?



Реклама

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real

