

Саратовский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

М. М. Карлинер

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯЦИОННО-ФАЗОВОГО
МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ
РЕЗОНАТОРОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ
ЧАСТОТАХ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Саратов 1961

Измерения добротности резонаторов играют важную роль в современной физике и технике. Известно, например, что без измерений добротности невозможно разработка таких электровакуумных приборов, как магнетроны, клистроны, резонансные разрядники и др. Кроме того, измерения добротности широко применяются в физике для исследования электрических и магнитных характеристик различных веществ. Для этого образцы исследуемого вещества помещают в специальный резонатор, параметры которого, и прежде всего добротность, затем измеряют. В частности, явления парамагнитного и ферромагнитного резонансов были впервые открыты Е. К. Завойским и Дж. Гриффитсом именно путем измерения добротности.

В связи с развитием науки измерения добротности резонаторов на СВЧ находят все более широкое распространение.

К сожалению, известные методы измерения добротности на СВЧ имеют некоторые недостатки. Одним из наиболее существенных недостатков является невозможность непрерывного наблюдения изменений добротности резонаторов под воздействием тех или иных факторов. Это связано с тем, что применяемые методы позволяют измерять добротность лишь косвенно, путем расчетов, производимых на основании результатов непосредственных измерений тех или иных вспомогательных величин (интервал частот между точками половинной мощности, наклон кривой, изображающей зависимость положения минимума стоячей волны от частоты и т. д.).

По этой же причине измерения добротности обычными методами довольно трудоемки.

В связи с указанными недостатками, которые затрудняют, а иногда и делают невозможной работу с резонансными методами исследований, автором была предпринята

попытка создания метода, позволяющего измерять добротность на СВЧ непосредственно, с отчетом по стрелочному прибору или осциллографу.

Сущность этого метода состоит в том, что на резонатор подаются модулированные по амплитуде СВЧ колебания резонансной частоты. При этом фаза огибающей сдвигается. Величина сдвига фазы огибающей непосредственно связана с добротностью резонатора. Поэтому измерение сдвига фазы огибающей позволяет измерять добротность.

Разработке и исследованию такого метода измерения добротности, который был назван модуляционно-фазовым, и посвящена настоящая работа.

Работа состоит из введения, семи глав и заключения.

Во введении отмечается практическая важность исследования модуляционно-фазового метода измерения добротности и вкратце излагается сущность метода.

В 1-й главе проведен анализ понятия добротности, изложена в сжатом виде теория эквивалентных схем резонаторов и приведен обзор известных методов измерения добротности на СВЧ.

В качестве основы принято определение добротности резонатора как отношения запасенной в нем электромагнитной энергии к потерям энергии за период колебаний. Показано, что собственная, внешняя и нагруженная добротности резонатора выражаются через производную фазы напряжения или тока по частоте.

Затем излагается теория эквивалентных схем резонаторов. Рассмотрено присоединение резонатора к линии через четырехполюсник. Если четырехполюсник не имеет потерь и его параметры не зависят от частоты, то система, состоящая из резонансного контура и четырехполюсника связи, может быть представлена в виде параллельного резонансного контура, присоединенного к отрезку линии передачи определенной длины. Резонансная частота эквивалентного контура в общем случае отличается от резонансной частоты контура, включаемого через четырехполюсник, благодаря реактивности, вносимой четырехполюсником.

Рассмотрен также резонансный контур, имеющий две связи, и найден его коэффициент передачи.

На основе теории эквивалентных схем резонаторов проводится классификация известных методов измерения до-

бротности на СВЧ. Все известные методы измерения добротности могут быть разделены на две группы: амплитудные и фазовые методы, в зависимости от того, какие характеристики используются для измерения добротности. Приводится обзор различных разновидностей амплитудных и фазовых методов. Как те, так и другие известные методы, имеют один существенный недостаток. Для каждого измерения необходимо произвести несколько отсчетов некоторой вспомогательной величины, после чего по результатам этих отсчетов может быть вычислена добротность.

В главе II излагается сущность и приводится математическое обоснование предлагаемого в диссертации модуляционно-фазового метода измерения добротности резонаторов на СВЧ.

Измеряемый резонатор присоединяется к измерительной линии с широкополосным зондом. В линию подаются модулированные по амплитуде СВЧ колебания, частота которых равна резонансной частоте резонатора. Зонд устанавливается в плоскости, отстоящей от резонатора на расстояние, равное целому числу полуволн в линии. Детектор зонда выделяет огибающую. При этом фаза огибающей оказывается сдвинутой относительно фазы падающей волны на угол Φ , через который выражается нагруженная добротность резонатора

$$Q_n = \frac{f_0}{2F} \cdot \operatorname{tg} |\Phi|, \quad (1)$$

где f_0 — резонансная частота, F — частота модуляции. Фазометр, измеряющий сдвиг фазы, может быть градуирован непосредственно в величинах нагруженной добротности.

Если переместить после этого зонд на четверть волны от его первоначального положения и измерить в новом положении сдвиг фазы огибающей Φ' , то можно определить собственную добротность резонатора:

$$Q_0 = \frac{f_0}{2F} \operatorname{tg} (\Phi' + |\Phi|). \quad (2)$$

Таким образом, модуляционно-фазовый метод позволяет измерять как нагруженную, так и собственную добротности резонатора.

Затем в главе II обсуждаются различные варианты схем, в которых может быть реализован модуляционно-фа-

зовый метод, а также варианты некоторых узлов, входящих в эти схемы.

Далее подробно рассмотрен процесс измерений добротности модуляционно-фазовым методом. Для установки зонда в плоскость, отстоящую от резонатора на целое число полуволн, можно применить следующий прием. Резонатор расстраивается так, чтобы его резонансная частота была далека от частоты резонатора. Зонд устанавливается в минимум стоячей волны. После этого резонатор настраивается в резонанс, причем индикация ведется по фазометру, т. к. при резонансе сдвиг фазы огибающей достигает максимума.

Если резонатор имеет фиксированную настройку, то расстраивают не резонатор, а генератор.

Модуляционно-фазовый метод позволяет наблюдать малые изменения нагруженной добротности и измерять их. С этой целью после того, как произведена настройка, фазовращателем компенсируют возникший сдвиг фазы. После компенсации чувствительность фазометра может быть повышена для наблюдения изменений добротности на растянутой шкале фазометра. Таким способом исключается или значительно уменьшается ряд погрешностей, благодаря чему малые изменения добротности измеряются с высокой точностью.

В конце главы II анализируются исходные предположения, на которых основано рассмотрение модуляционно-фазового метода измерения нагруженной и собственной добротности.

Для исследования отклонений, которые имеют место при неточном выполнении исходных предположений, необходимо было рассмотреть воздействие на резонатор синусоидального сигнала, модулированного как по амплитуде, так и по фазе, т. к. паразитная фазовая модуляция почти всегда сопровождает амплитудную модуляцию.

В связи с этим в главе III решается общая задача о воздействии на линейную цепь синусоидального сигнала с модуляцией произвольного вида: по амплитуде и по фазе. Для решения этой задачи был применен метод, представляющий собой обобщение известных методов расчета воздействия амплитудно-модулированных сигналов на линейные системы. Метод основан на введении комплексных операторных амплитуд для модулированных сигналов.

Полученные результаты применены в главах IV и V для расчета воздействия модулированного сигнала на резонатор, присоединенный к линии. При этом предполагается, что сигнал на входе измерительной линии, к которой присоединен резонатор, может быть представлен в виде суммы несущей и боковых частот. Высшими составляющими боковых полос можно пренебречь при малом коэффициенте модуляции, что фактически имело место в экспериментальной установке. При чисто амплитудной модуляции векторы, изображающие напряжения боковых частот, равны друг другу и расположены в любой момент времени симметрично относительно вектора несущей. В более общем случае векторы боковых частот расположены несимметрично относительно вектора несущей и их модули неравны. При этом имеет место также фазовая модуляция. Отклонение от чисто амплитудной модуляции может быть охарактеризовано углом асимметрии, равным углу между вектором несущей и биссектрисой угла между векторами боковых частот, а также коэффициентом асимметрии, связанным с неравенством амплитуд напряжений боковых частот. При обращении в нуль этих величин имеет место чисто амплитудная модуляция.

Рассмотрено воздействие описанного выше сигнала на резонансный контур в следующих случаях:

- а) зонд измерительной линии установлен в плоскости, отстоящей от клемм резонатора на целое число полуволн, а частота несущей изменяется в некоторых пределах вблизи резонанса;
- б) частота равна резонансной частоте резонатора, а зонд измерительной линии перемещается.

Расчеты показывают, что в первом случае при неравном углу и коэффициенте асимметрии, максимум сдвига фазы огибающей не совпадает с частотой резонанса, а смещен относительно нее на некоторую величину. Сдвиг фазы огибающей при частоте резонанса остается неизменным, а максимальный сдвиг фазы превышает резонансную величину. Направление смещения максимума зависит от знаков угла и коэффициента асимметрии. Получены выражения для ошибки измерения при настройке по максимуму сдвига фазы огибающей, если сигнал содержит паразитную фазовую модуляцию.

Во втором случае зависимость сдвига фазы огибающей от положения зонда также оказывается несимметричной,

причем максимум сдвига фазы превышает величину, найденную по формуле (1). И для этого случая получено выражение для соответствующей погрешности. В главе IV рассмотрено также влияние высших составляющих боковых полос.

В главе VI описано экспериментальное исследование модуляционно-фазового метода измерения добротности. Для экспериментального исследования был выбран трехсантиметровый диапазон, в котором использован волновод сечением 23×10 мм.

В качестве генератора СВЧ колебаний использовался клистрон, установленный в генераторной секции с волноводным выходом. Частота колебаний измеряется эхо-резонатором с микроамперметром в качестве индикатора. Через развязывающий аттенюатор СВЧ колебания поступают на амплитудный модулятор. Последний состоит из двойного тройника, детекторной головки, включенной в H-плечо тройника, и подвижного короткозамыкающего поршня, включенного в E-плечо тройника. Амплитудная модуляция происходит благодаря подаче модулирующего напряжения на кристаллический детектор, помещенный в канал волновода. При этом коэффициент отражения периодически меняется, что и приводит к модуляции. С помощью поршня можно добиться модуляции выходного напряжения, приближающейся к чисто амплитудной.

Модулированные колебания через второй развязывающий аттенюатор поступают в измерительную линию, снабженную широкополосным зондом с детектором. К фланцу измерительной линии присоединяется резонатор, добротность которого необходимо измерить.

Огибающая СВЧ колебаний выделяется кристаллическим детектором зонда измерительной линии. Для измерения сдвига фазы частота огибающей предварительно преобразуется. В качестве смесителя при этом используется тот же детектор, который выделяет огибающую. С этой целью на детектор подается гетеродинное напряжение, частота которого на 500 кГц ниже частоты огибающей. Напряжение разностной частоты 500 кГц затем усиливается усилителем и через грубый фазовращатель и точный фазовращатель подается на фазометр, который позволяет производить отсчет разности фаз непосредственно по стрелочному индикатору.

Показания фазометра в широких пределах не зависят от амплитуды сигнала. Фазометр имеет три шкалы: $0-90^\circ$, $0-30^\circ$, $0-10^\circ$. Погрешность измерения разности фаз до 30° не превышает 3%.

Были проанализированы погрешности измерительной установки. Основными источниками погрешностей являются следующие:

1. Наличие отражения от развязывающего аттенюатора.
2. Наличие отрезка линии конечной длины между резонатором и зондом.
3. Неточная настройка в резонанс.
4. Неточная установка зонда в плоскости эквивалентного представления резонатора.
5. Паразитные фазовая и частотная модуляции, сопровождающие амплитудную модуляцию.
6. Наличие гармоник огибающей входного сигнала.
7. Ошибка измерения сдвига фазы огибающей.

Расчет показывает, что максимальная погрешность не превышает 10—11%.

Вопросам измерения разности фаз посвящен отдельный раздел диссертации. В процессе подготовки к экспериментальному исследованию была разработана прецизионная фазометрическая аппаратура. В соответствующем разделе приведены теоретическое обоснование и расчет погрешностей схем фазометра и фазовращателей, а также результаты их экспериментальной проверки.

Для экспериментальной проверки точности модуляционно-фазового метода были применены специально разработанные резонаторы, добротность которых была предварительно многократно измерена другими методами, имеющими малую систематическую погрешность. Благодаря усреднению результатов многократных измерений случайная ошибка исключалась, а оставшаяся систематическая ошибка не превышала 2—3%. Затем добротность измерялась модуляционно-фазовым методом. Проводились измерения резонаторов, нагруженная добротность которых имела значения от 200 до 500 и собственная добротность — от 380 до 1300.

По результатам измерений погрешность модуляционно-фазового метода при измерении нагруженной добротности

не превышает 6—6,5%, а при измерении собственной добротности — 10—15%.

В главе VII рассмотрен вопрос о границах применимости модуляционно-фазового метода измерения добротности. Показано, что измеряемые нагруженные добротности должны лежать в пределах от 20—40 до 1500—1600. Коэффициент связи измеряемых резонаторов должен лежать в пределах от 0,25 до 4. Вне указанных пределов погрешность модуляционно-фазового метода увеличивается.

Разработанный метод измерения добротности наиболее удобен для исследования электромагнитных свойств различных материалов резонансными методами. Однако, во многих случаях модуляционно-фазовый метод может быть применен для контроля резонаторов, электровакуумных приборов (магнетронов, отражательных клистронов и др).

В конце работы описаны два примера, где практически применен разработанный метод измерения: исследование ферромагнитного резонанса в никеле и непрерывный контроль толщины никелевого покрытия на тонкой проволоке.

Решение поставленной задачи создания метода измерения добротности на СВЧ с прямым отсчетом и повышенной чувствительностью к малым изменениям добротности, а также проведенное исследование этого метода позволяют вести разработку усовершенствованной аппаратуры для измерений электромагнитных характеристик материалов, параметров СВЧ приборов и автоматизации контрольно-измерительных операций.

Основные результаты работы были доложены автором на Второй Всесоюзной конференции МВО СССР по радиоэлектронике, неоднократно докладывались на Радиофизическом семинаре Саратовского госуниверситета, а также опубликованы в следующих изданиях:

1. Известия высших учебных заведений МВО, сер. Радиофизика, 1958 г., т. 1, № 3, стр. 95—103.
2. Вторая Всесоюзная конференция МВО СССР по радиоэлектронике. Тезисы докладов и сообщений, сентябрь 1957 г.

На модуляционно-фазовый метод выдано авторское свидетельство за № 16422 от 21 апреля 1954 года (в соавторстве с Г. В. Кирилловым).

Ответственный за выпуск В. М. Дашенков