Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 1, 1968 г.

УДК 530.93

ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. С. Кричевский, Е. П. Тонкой

Рациональный метод измерения влажности тех или иных материалов, оптимальную рабочую частоту, на которой эти измерения будут проводиться, а следовательно, и рациональную схему измерительного устройства можно наметить только на основании анализа частотных характеристик: $\rho(\omega)$ — удельного сопротивления; $\varepsilon(\omega)$ — диэлектрической проницаемости; $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ — угла потерь контролируемого материала. Применяемые методы получения семейств частотных характеристик при различных влагосодержаниях широкополосными мостами с раздельным отсчетом активного сопротивления r и кажущейся емкостью C (например, мост типа Е-10-2) требуют больших затрат времени и, как правило, приводят к существенным ошибкам, связанным с изменением параметров влажного материала в процессе исследования. Необходимо поэтому сократить время, нужное для получения частотных характеристик, чтобы можно было пренебречь временной нестабильностью параметров материала. Надо также иметь в виду, что применяемые методы сопряжены с большим числом отдельных измерений (несколько десятков и даже сотен).

Предлагаемый метод получения частотных характеристик влажных материалов основан на использовании выпускаемого отечественной промышленностью прибора XI-1A, представляющего собой комбинацию генератора качающейся частоты и осциллографа [Справочник..., 1966]. Прибор предназначен для исследования и настройки в промышленных условиях четырехполюсников (в диапазоне 0,4—40 *Мгц*) по наблюдаемым на экране осциллографа их амплитудно-частотным характеристикам. Для исследуемого влажного материала такие характеристики получаются на экране осциллографа мгновенно и могут быть либо сфотографированы, либо перенесены на кальку для дальнейшей обработки (рис. 1).

Четырехполюсник состоит из датчика, заполненного влажным материалом и сопротивления r_0, выбираемого из условия

$$r_0 \ll Z_x, \tag{1}$$

где Z_x — полное сопротивление датчика.

Кроме этого, необходимо выполнить условие согласования нагрузки прибора XI-1A, т. е. выбрать $Z_x \gg 75$ *ом*. Если конструкция датчика и параметры исследуемого материала затрудняют выполнение поставленных условий, то между выходом прибора и четырехполюсником устанавливается катодный повторитель.

Принимая за основу параллельную схему замещения датчика влажности [Хиппель, 1960] для модуля передаточного коэффициента такого четырехполюсника, имеем

$$K_{(\omega)} = \sqrt{1 + (\omega C_x r_x)^2}\,\frac{r_0}{r_x}, \tag{2}$$

где C_x и r_x — параметры схемы замещения.

Поскольку для исследуемого четырехполюсника абсолютная величина коэффициента передачи значительно < 1 [формула (1)], а прибор XI-1A предназначен для работы с четырехполюсниками, имеющими $K_{\omega} \geqslant 5$, то на выходе четырехполюсника должен быть установлен широкополосный усилитель. В частности, удобно использовать усилитель лампового вольтметра В3-4, имеющего коэффициент усиления 100. Представленную схему целесообразно применять для получения частотных характеристик материалов, которые принадлежат к классу электролитов или диэлектриков. Так, для медно-никелевых кеков или железорудных флотационных фильтров известно, что $\frac{1}{r_x} \geqslant \omega C_x$. Тогда выражение для модуля коэффициента передачи принимает вид:

$$K_{(\omega)} = \frac{r_0}{r_x} = r_0 Y_x.$$

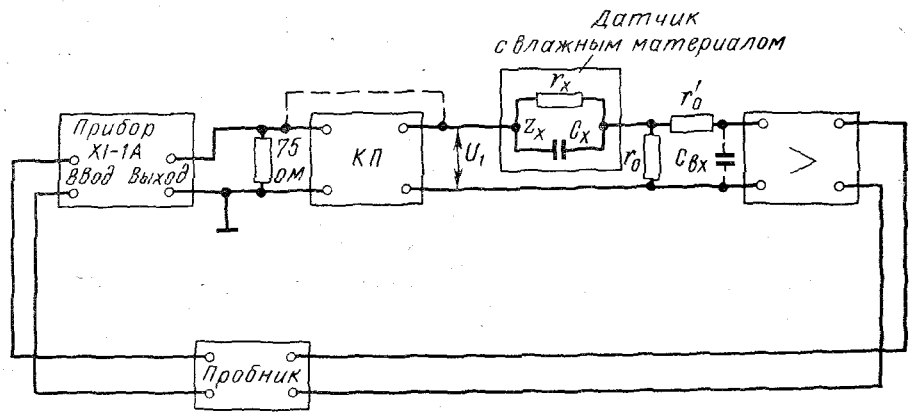


Рис. 1. Блок-схема установки для снятия частотных характеристик $Y_{x\omega}$, $C_{x\omega}$ и $Z_{x\omega}$ влажных материалов.

Следовательно, наблюдаемая на экране прибора XI-1A кривая является непосредственно частотной характеристикой удельной проводимости влажного материала $Y_{x\,(\omega)}$. Для таких материалов как апатитовые или нефелиновые концентраты известно, что $\omega C_x \geqslant \frac{1}{r_x}$ и, следовательно,

$$K_{(\omega)} \approx \omega r_0 C_x.$$

В этом случае наблюдаемая кривая после деления ее ординат на соответствующие значения ω дает частотную характеристику диэлектрической проницаемости материала.

Однако для большинства влажных материалов невозможно четкое разделение на диэлектрики и электролиты (медно-никелевые агломерационные шихты, угольная шихта и др.). Один и тот же материал может при изменении влагосодержания переходить из одного класса в другой. В этом случае необходимо раздельное получение характеристик $Y_{x\,(\omega)}$ и $C_{x\,(\omega)}$ с сохранением экспрессности анализа.

Для этого пробник прибора заменяется фазочувствительным детектором (рис. 2), который с учетом измерений на высоких частотах рекомендуется выполнять по схеме [High-frequance..., 1958].

Исследуемый четырехполюсник собирается аналогично схеме рис. 1, и условие $r_0 \ll Z_x$ по-прежнему соблюдается. Тогда выходное напряжение четырехполюсника

$$\dot{U}_2 = U_1 \frac{r_0}{r_x} + jU_1 \omega C_x, \qquad (3)$$

т. е. его составляющие порознь пропорциональны активной и реактивной проводимостям датчика.

Коммутирующее напряжение $\dot{U}_к$ на фазочувствительный детектор подается с фазовращателя и предварительно усиливается. Во избежание дополнительных фазовых сдвигов между напряжениями $\dot{U}_x$ и $\dot{U}_к$, которые могут привести к увеличению погрешности, следует в обеих цепях использовать идентичные усилители (вольтметры В3-4) [Мелик-Шахназаров, 1964].

При выполнении этого условия вектор коммутирующего напряжения (в зависимости от положения переключателя фазовращающей цепи) будет строго совпадать по направлению только с одной из составляющих напряжений $\dot{U}_2$ и строго ортогонален по отношению к другой. В результате на экране прибора последовательно будут получены характеристики $Y_{x(\omega)}$ и $C_{x(\omega)}$ (для получения второй характеристики наблюдаемые ординаты делятся на соответствующие значения ω).

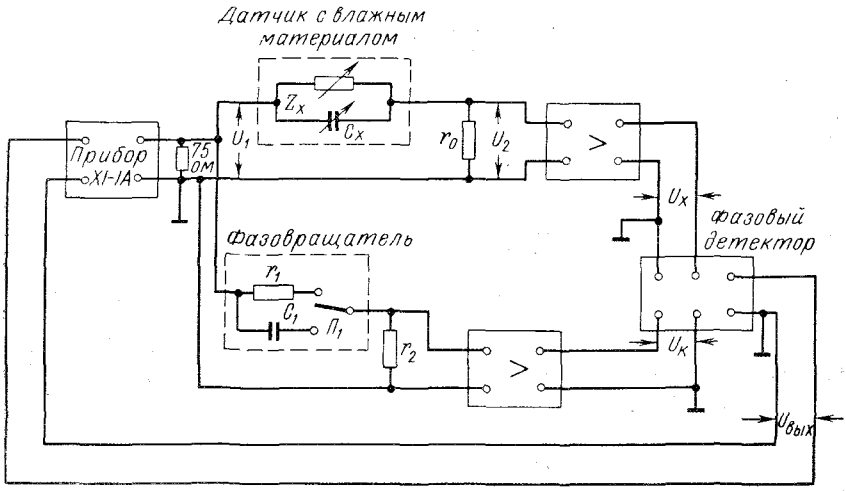


Рис. 2. Блок-схема установки для раздельного определения частотных характеристик удельной проводимости и диэлектрической проницаемости влажных материалов.

Следует учитывать, что погрешность фазочувствительного детектора зависит от соотношения уровней напряжений $\dot{U}_x$ и $\dot{U}_к$. Чтобы погрешности не превосходили 1—1,5%, рекомендуется выбирать $\dot{U}_к \approx (15 \div 20)\, U_x$.

Частотная характеристика $Z_{x(\omega)}$ может быть получена на установке, выполненной по схеме рис. 1, но в исследуемом четырехполюснике сопротивления Z_x и r_0 следует поменять местами и выбирать r_0 так, чтобы оно удовлетворяло условию $r_0 \gg Z_x$. Тогда передаточный коэффициент четырехполюсника

$$K_{(\omega)} = \frac{Z_x}{Z_x + r_0} \approx \frac{Z_x}{r_0},$$

т. е. получим требуемую частотную характеристику $Z_{x(\omega)}$.

Узлы измерительной схемы (усилители, прибор XI-1A и др.) могут вносить определенные искажения в результаты проводимых измерений. В первую очередь, будет сказываться влияние входной емкости усилителя $C_{вх}$, которая обычно составляет (10 ÷ 20) *пф*, соизмерима с емкостью датчика влажности и, следовательно, может существенно исказить искомую частотную характеристику.

Для устранения возникающих погрешностей можно применить следующий способ коррекции. При постановке в схему измерений реального датчика с контролируемым материалом общий коэффициент передачи измерительной схемы

$$K_{общ} = K_{(\omega)} \prod K_i,$$

где $\prod K_i$ — произведение коэффициентов передачи узлов измерительной схемы, исключая исследуемый четырехполюсник.

Приведенное равенство справедливо, когда смежные узлы измерительной схемы не влияют на величину коэффициента передачи четырехполюсника. Со стороны входа это влияние устраняется установкой катодного повторителя, когда нельзя принять $Z_x \gg 75$ *ом*. Со стороны выхода это же может быть достигнуто введением блокирующего сопротивления r_0' ($r_0' \gg r_0$) (рис. 1).

Если теперь вместо датчика с материалом включить эталонное сопротивление, то $K_{(\omega)}$ будет равен постоянному числу K_0, а общий коэффициент передачи

$$K'_{\text{общ}} = K_0 \prod K_i.$$

Разделив затем соответствующие ординаты кривых, получаемых на экране в первом и втором случае, получим

$$\frac{K_{\text{общ}}}{K'_{\text{общ}}} = \frac{K_{(\omega)}}{K_0}.$$

Этот же способ частотной коррекции полностью применим к схеме рис. 2, так как при правильно сбалансированном фазочувствительном детекторе колебания амплитуды коммутирующего напряжения в пределах 20—25% не вносят погрешности в измерения и, следовательно, частотная характеристика канала коммутирующего напряжения практически не влияет на искомую частотную характеристику. При наличии характеристик $r_{x(\omega)}$, $C_{x(\omega)}$ и $Z_{x(\omega)}$ характеристика $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ получается несложным и хорошо известным пересчетом.

Предложенный метод позволяет существенно ускорить процесс получения частотных характеристик влажных материалов, диэлектриков или полупроводников, что позволит ему найти применение при решении широкого круга инженерно-физических задач.

ЛИТЕРАТУРА

Мелик-Шахназаров А. М. Автоматический компенсатор переменного тока. Измер. техн., № 8, 1964.

Справочник по радиоизмерительным приборам. Сов. радио, 1966.

Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. ИЛ, 1960.

High-frequance phase detector. Electronics, № 31, 1958.