Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.ХУШ, вып. 1, 1975 г.

ФАЗОВЫЙ КОНДУКТОМЕТР

Е.С.Кричевский, А.И.Нудельман

Изменения проводимости участка электрической цепи широко используются для измерения зольности, влажности, солесодержания и других параметров твердых, жидких и сыпучих материалов; это позволило практически реализовать ряд измерительных приборов и систем, нашедших широкое применение в химической, горно-металлургической и других отраслях промышленности, а также в энергетике и практике научных исследований [2, 3, 4]. Однако серьезный недостаток таких приборов и систем – сложность выходных измерителей. Это затрудняет использование таких приборов в системах автоматики.

В качестве выходного измерителя обычно используют мостовые схемы, которые обеспечивают необходимую точность измерений, но требуют трудоемких операций по раздельному уравновешиванию амплитуды и фазы выходного сигнала. Что же касается мостов с автоматическим уравновешиванием [1], то они весьма сложны и громоздки. В некоторых случаях роль выходного измерителя исполняет прибор, замеряющий ток датчика, однако такой способ не точен, поскольку результат существенно зависит от напряжения питания; кроме того, переменность проводимости датчика затрудняет его согласование с питающим генератором и выходным измерительным прибором.

В рассматриваемом способе измерения активных проводимостей удается полностью устранить указанные недостатки и, соответственно, получать на его базе весьма перспективные по своим возможностям и относительно простые в реализации измерительные приборы. В схеме (рис. 1), иллюстрирующей предлагаемый способ, сопротивление R_1 является объектом измерения. Имеется в виду твердое, жидкое или сыпучее вещество, помещенное в соответствующий контейнер с электродами, обладающими незначительной собственной емкостью. Емкость C_1 подключается

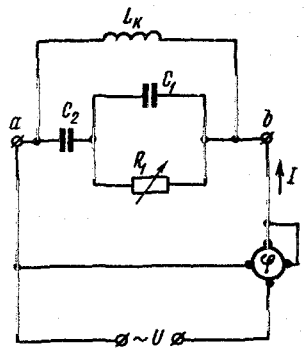


Рис. 1. Принципиальная схема кондуктометра

параллельно объекту измерения R_1 и имеет значительно большую величину, чем собственная емкость объекта измерений; C_2 – удлиняющая емкость, $L_к$ – компенсирующая индуктивность, φ – фазометр.

На рис. 2,а и б изображены амплитудно-фазовые характеристики рассматриваемой цепи соответственно без компенсирующей индуктивности $L_к$ и при ее наличии, когда величина $L_к$ выбрана по предлагаемой авторами формуле. Сущность предлагаемого метода компенсации состоит в обеспечении постоянства тока цепи в условиях изменения проводимости контролируемого участка в пределах 0-∞. Единственной переменной величиной, по изменениям которой и судят о величине проводимости, является фазовый угол.

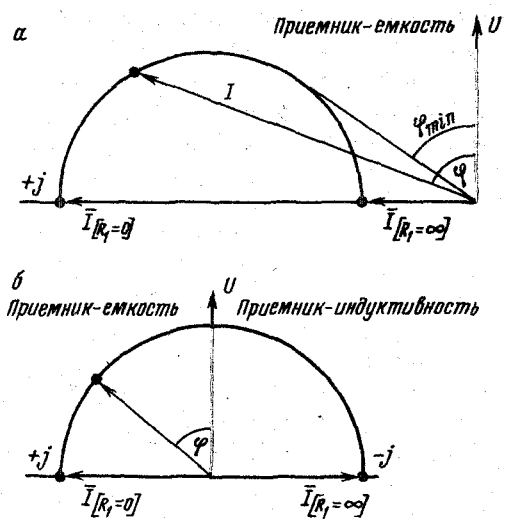


Рис. 2. Амплитудно-фазовые характеристики кондуктометра

Доказательство существования условия, при котором начало вектора тока совмещается с центром полуокружности годографа, а ток сохраняет постоянство при изменении R_1 от 0 до ∞ получим, анализируя выражение комплексной проводимости на зажимах (см.рис.1):

$$\dot{y} = \frac{R_1 x_1^2}{R_1^2 (x_1 + x_2)^2 + x_1^2 x_2^2} + j\left[\frac{R_1^2 (x_1 + x_2) + x_1^2 x_2}{R_1^2 (x_1 + x_2)^2 + x_1^2 x_2^2} - \frac{1}{x_L}\right], \quad (1)$$

где

$$x_1 = \frac{1}{\omega C_1}; \qquad x_2 = \frac{1}{\omega C_2};$$

$$x_L = \omega L_к .$$

Согласно выражению (1), модуль вектора полной проводимости

$$y = \frac{1}{x_L}\sqrt{\frac{x_1^2(x_L - x_2)^2 + R_1^2(x_L - x_1 - x_2)^2}{R_1^2(x_1 + x_2)^2 x_1^2 x_2^2}} \quad . \qquad (2)$$

При постоянстве тока постоянна также проводимость, поэтому

$$\frac{\partial y}{\partial R_1} = 0 \, .$$

Дифференцируем выражение (2) по R_1. Для упрощения выкладок представляем формулу (2) в виде

$$y = \frac{1}{x_L}\sqrt{\frac{kR_1^2 + l}{mR_1^2 + n}} \quad , \qquad (3)$$

где

$$k = (x_L - x_1 - x_2)^2; \quad l = x_1^2(x_L - x_2)^2; \quad m = (x_1 + x_2)^2; \quad n = x_1^2 x_2^2 \; ;$$

$$\frac{\partial y}{\partial R_1} = \frac{R_1(kn - lm)}{x_L(l + kR_1^2)^{1/2}(mR_1^2 + n)^{3/2}} \, .$$

Производная равна нулю при

$$\begin{aligned} R_1 &= 0 \; ; \\ R_1 &= \infty \; ; \\ kn &= lm \, . \end{aligned} \qquad (4)$$

Последнее равенство не содержит R_1, следовательно при выполнении условия (4) производная равна нулю независимо от значения R_1. В этом случае полная проводимость и полный ток (при $U = const$) остаются постоянными при любом изменении R_1. Таким образом, искомое условие найдено.

Равенство (4) после подстановки значений параметров, согласно выражению (3), приводит к формуле

$$x_L = \frac{2(x_1 + x_2)x_2}{2x_2 + x_1}$$

или для компенсирующей индуктивности

$$L_K = \frac{2(C_1 + C_2)}{\omega^2 C_2(2C_1 + C_2)} \, . \qquad (5)$$

Предлагаемый режим измерений в сочетании с использованием фазометра в качестве выходного измерителя имеет ряд существенных метрологических преимуществ: 1) постоянство проводимости измерительной цепи при изменении проводимости контролируемого участка в широких пределах, что позволяет точно согласовать сопротивление измерительной цепи с сопротивлением питающего генератора и выходного измерителя; этим обеспечивается оптимальное энергетическое использование генератора и измери-

тельного прибора на всем интервале измерений; 2) результат измерения, благодаря использованию фазометра в качестве выходного измерителя, не зависит от напряжения источника питания, стабильной должна оставаться лишь частота генератора. Это обстоятельство весьма существенно, поскольку стабилизировать высокочастотное напряжение сложно, в то время как стабилизация частоты достигается относительно простыми средствами.

Следует заметить, что использование фазометра в качестве выходного измерителя без компенсирующей индуктивности $L_к$ не дает существенных преимуществ. Как видно из рис. 2,а, в этом случае, при изменении R_1 от 0 до ∞ угол φ меняется от $+\frac{\pi}{2}$ до φ_{min} и от φ_{min} до $+\frac{\pi}{2}$, т.е. φ как функция R_1 имеет экстремальный характер. Результат измерения может быть неоднозначным, поскольку каждому значению φ соответствует два различных значения R_1. Предельное изменение угла невелико и всегда меньше $\frac{\pi}{2}$.

При использовании компенсирующей индуктивности (рис. 2,б) угол φ меняется монотонно, от $+\frac{\pi}{2}$ до $-\frac{\pi}{2}$. Этим устраняется возможная неоднозначность показания, а чувствительность измерений повышается, поскольку для тех же пределов изменения R_1 (нуль – бесконечность) изменение φ вдвое больше: φ меняется на угол π.

Литература

1. Кнеллер В.Ю. *Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления.* М., "Энергия", 1967.

2. Кулаков М.В., Казаков А.В., Шелястин М.В. Технологические измерения и аналитические приборы в химической промышленности. М., "Машиностроение", 1964.

3. Лион Курт С. Приборы для научных исследований. Л., "Машиностроение", 1964.

4. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. Л., Госэнергоиздат, 1954.