

5.7
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 137 1958

П. М. ПЛАКК

**НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ
КОНДЕНСАТОРОВ С БОЛЬШИМИ
ПОТЕРЯМИ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958

Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 137 1958

П. М. ПЛАКК

**НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ
КОНДЕНСАТОРОВ С БОЛЬШИМИ
ПОТЕРЯМИ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958

П. М. Плакк

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ
С БОЛЬШИМИ ПОТЕРЯМИ

Издательство Таллинского Политехнического Института

*

Редактор А. Вольдек
Технический редактор А. Тамм
Корректор Х. Силламаа

Сдано в набор 8. V 1958. Подписано к печати 2. VI 1958. Бумага
54×84¹/₁₆. Печатных листов 0,75. По формату 60×92 печатных
листов 0,62. Учетно-издательных листов 0,43. Тираж 800.
МВ-04222. Заказ № 383

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин

Цена 35 коп.

~~P 37 837~~

Er. 2313



1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема электрического измерения влажности материалов с большой и переменной проводимостью до настоящего времени окончательно не решена. Измерительный образец таких материалов, как например, хлебное тесто, влажные земли и т. п. представляет собой конденсатор с потерями, емкость которого зависит от влажности вещества. В то же время активное сопротивление образца меняется в очень широких пределах в зависимости от степени кислотности теста, от содержания соли и т. д., а в случае земель от их состава. С конденсаторными образцами, обладающими большими и переменными потерями, приходится иметь дело и во многих других случаях. При встречающихся на практике крайних значениях влажности тангенс угла потерь становится равным или меньше единицы лишь при весьма высоких частотах, порядка от нескольких до нескольких десятков мегагерц.

Обычно такие конденсаторы могут быть представлены эквивалентной схемой в виде параллельного соединения емкости и активного сопротивления. Известные в настоящее время методы измерения емкости таких конденсаторов в производственных условиях непригодны.

2. Метод измерения

Полное сопротивление параллельно включенных емкости C и активного сопротивления r (рис. 1) определяется формулой

$$\dot{Z} = \frac{r \cdot \frac{1}{j\omega C}}{r + \frac{1}{j\omega C}} \quad (1)$$

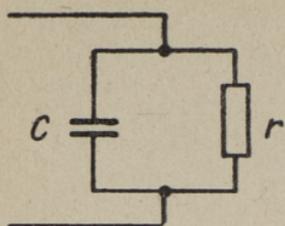


Рис. 1 Схема замещения конденсатора для расчета полного сопротивления.

Эта формула непосредственно не дает достаточно наглядного представления об изменении модуля и фазы полного сопротивления \dot{Z} , вызванном изменением r или C . Лучше рассматривать поведение вектора \dot{Z} на комплексной плоскости в зависимости от r и C . Для этого исходим из выражения полной проводимости

$$\dot{G} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{r} + j\omega C,$$

которая на комплексной плоскости проводимостей тоже представляется вектором. В случае, когда мнимая часть ωC вектора \dot{G} постоянна, а действительная часть $1/r$ меняется в диапазоне от 0 до ∞ , конец вектора \dot{G} описывает прямую, параллельную действительной оси (рис. 2, прямая 1). В случае же, когда $1/r$ постоянна, а ωC меняется от 0 до ∞ , получается прямая параллельная мнимой оси (рис. 2., прямые 2 и 3). Каждая прямая характеризуется значением постоянной составляющей полной проводимости, а вся совокупность таких прямых образуют в первом квадранте комплексной плоскости координатную сетку, позволяющую легко найти модуль G и фазу φ вектора полной проводимости

$$\dot{G} = G e^{j\varphi}. \quad (2)$$

В то же время вектор полного сопротивления

$$\dot{Z} = \frac{1}{\dot{G}} = \frac{1}{G} e^{-j\varphi} \quad (3)$$

может быть получен просто конформным преобразованием (инверсией) комплексной функции \dot{G} . При этом прямоугольная координатная сетка плоскости проводимостей преобразуется в круговую сетку (семейство круговых

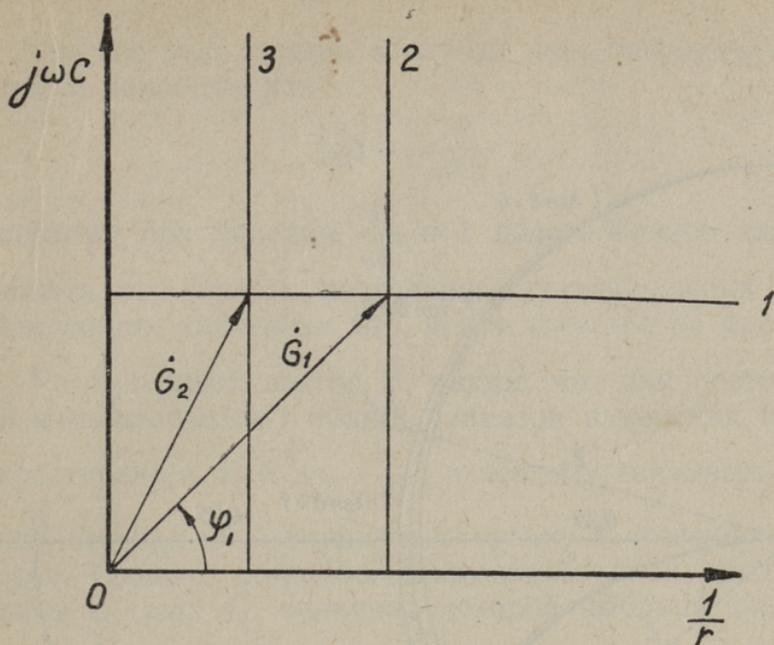


Рис. 2. Изображение кривых проводимостей для параллельного соединения C и r в плоскости проводимости.

диаграмм) на плоскости сопротивления (Z — плоскость). По полученной сетке легко следить за изменениями модуля и фазы вектора \dot{Z} .

Согласно свойствам инверсного отображения плоскости проводимостей любая расположенная в первом квадранте параллельно мнимой оси прямая преобразуется в полуокружность, расположенную в четвертом квадранте, проходящую через начало координат и имеющую центр на действительности оси в точке $\frac{r}{2}$. Аналогично прямая, параллельная действительной оси плоскости проводимостей преобразуется в полуокружность, с центром на мнимой оси в точке $-\frac{1}{2\omega C}$ и проходящую через начало координат. На рис. 3 представлены полуокружности на плоскости сопротивления, соответствующие значениям $\frac{1}{\omega C} = 0,95; 1,00; 1,05$, а также полуокружности, соответствующие значениям $r = 1,00; 2,00$.

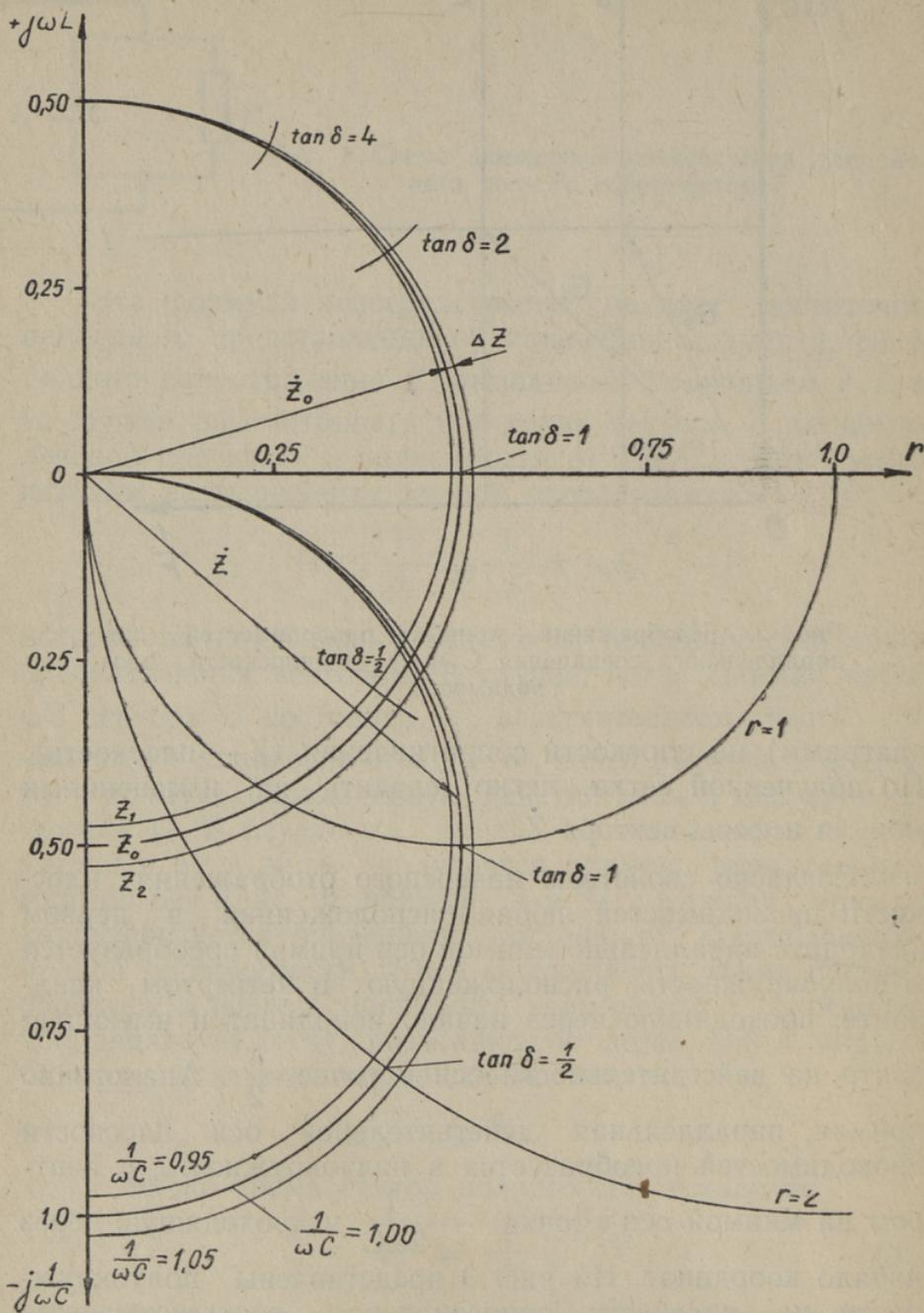


Рис. 3. Круговые диаграммы измерительного двухполюсника в плоскости сопротивления.

Тангенс угла потерь в случае параллельного соединения выражается как

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C r}$$

и поэтому при условии $\frac{1}{\omega C} = 1$ целесообразно характеризовать окружности постоянного сопротивления соответствующим значением $\operatorname{tg} \delta$, что и делается на рис. 3.

Рассматривая вектор \dot{Z} , видим, что при постоянном C и изменяющемся r общий диапазон изменения модуля Z простирается от 0 до $\frac{1}{\omega C}$, и поэтому связывать изменения вектора \dot{Z} с изменением только C конечно невозможно. Однако, дополнив схему постоянной индуктивностью L (рис. 4), величина которой выбрана так, что $\omega L = \frac{1}{2\omega C}$, получим двухполюсник AB , полное сопротивление которого выражается

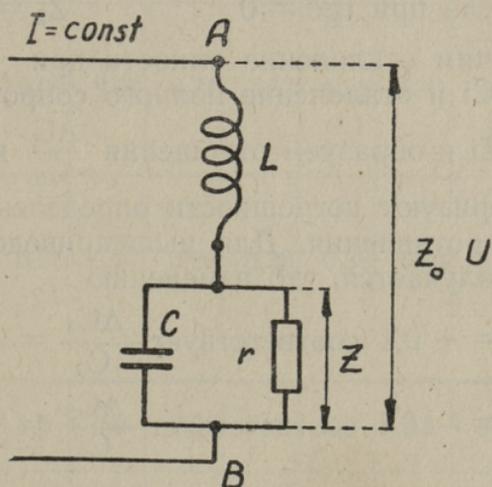


Рис. 4. Схема измерительного двухполюсника.

тивление которого выражается

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z} + j\omega L. \quad (4)$$

Годографом вектора полного сопротивления Z_0 при изменении r является полуокружность с центром в начале координат. Соответствующая окружность на рис. 3 обо-

значена через Z_0 . Для описанного двухполюсника изменение сопротивления r , шунтирующего емкость C , вызовет изменение только фазы полного сопротивления \dot{Z}_0 , а модуль Z_0 остается постоянным.

В то же время изменение C приводит и к изменению модуля Z_0 . Абсолютная величина изменения модуля Z_0 при этом зависит кроме емкости еще и от тангенса угла потерь конденсатора.

Рассмотрим на рис. 3 следующие окружности:

$$\text{а) } Z_0, \text{ которая соответствует } \frac{1}{\omega C_0} = 1;$$

$$\text{модуль при } \operatorname{tg} \delta = 0 \quad Z_0 = 0,50$$

$$\text{б) } Z_1, \text{ которая соответствует } \frac{1}{\omega C_1} = 0,95;$$

$$\text{модуль при } \operatorname{tg} \delta = 0 \quad Z_1 = 0,45$$

$$\text{в) } Z_2, \text{ которая соответствует } \frac{1}{\omega C_2} = 1,95;$$

$$\text{модуль при } \operatorname{tg} \delta = 0 \quad Z_2 = 0,55$$

Обозначим отклонение емкости при $\operatorname{tg} \delta = 0$ через $\Delta C = C_0 - C_i$ и отклонение полного сопротивления через $\Delta Z = Z_0 - Z_i$ и образуем отношения $\frac{\Delta C}{C_0}$ и $\frac{\Delta Z}{Z_0}$. Последние характеризуют погрешности определения емкости и полного сопротивления. Для вышеприведенного случая ($\operatorname{tg} \delta = 0$) получается, что изменению

$$\frac{\Delta Z_1}{Z_0} = +0,1 \text{ соответствует } \frac{\Delta C_1}{C_0} = -0,053 \text{ и}$$

$$\frac{\Delta Z_2}{Z_0} = -0,1 \text{ соответствует } \frac{\Delta C_2}{C_0} = +0,047.$$

Из сравнения следует, что отклонение полного сопротивления два раза больше отклонения емкости.

На основе круговых диаграмм выясняется, что при постоянном значении отклонения емкости отклонение полного сопротивления уменьшается пропорционально длине дуги окружности Z_0 . Отклонение будет максимальным при $\operatorname{tg} \delta = 0$ и отсутствует при $\operatorname{tg} \delta = \infty$. В последнем случае изменение емкости не влияет на Z_i , так как конденсатор шунтируется сопротивлением $r = 0$.

При питании приведенного на рис. 4 двухполюсника током постоянной величины I , напряжение между точками А и В $U_0 = IZ_0$ будет непосредственно пропорционально Z_0 и постоянному значению C_0 соответствует постоянное значение напряжения. Следовательно, ошибка измерения напряжения непосредственно определяет погрешность определения Z_0 . Так как для данного способа измерения абсолютное значение напряжения не имеет значения, а его отклонение от определенного базисного значения U_0 , то определение отклонения напряжения возможно с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$, что соответствует и погрешности измерения.

С учетом вышеизложенного составлена таблица, показывающая зависимость погрешности измерения по данному методу от величины тангенса угла потерь конденсатора.

$\text{tg}\delta$	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$\frac{\Delta Z}{Z_0} \%$ если $\frac{\Delta C}{C_0} = 5\%$	10,00	9,37	8,74	7,57	6,56	5,71	5,00	4,41	3,94
$\frac{\Delta C}{C_0} \%$ если $\frac{\Delta Z}{Z_0} = 0,5\%$	0,25	0,27	0,29	0,33	0,38	0,44	0,50	0,57	0,64

$\text{tg}\delta$	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	4,0	5,0
$\frac{\Delta Z}{Z_0} \%$	3,50	3,23	2,94	2,72	2,52	2,33	2,18	2,06	1,56	1,22
$\frac{\Delta C}{C_0} \%$	0,72	0,78	0,85	0,92	0,99	1,07	1,15	1,21	1,6	2,1

Учитывая сравнительно высокую точность и простую методику измерения, данный метод подходит для измерения емкости конденсаторов как с потерями, так и без потерь.

3. Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов была собрана схема по рис. 5. Постоянство тока I , получаемого от высокочастотного генератора постоянной частоты H , обеспечивалось благодаря последовательно включенному добавочному сопротивлению r_e . Между точками A и B включался

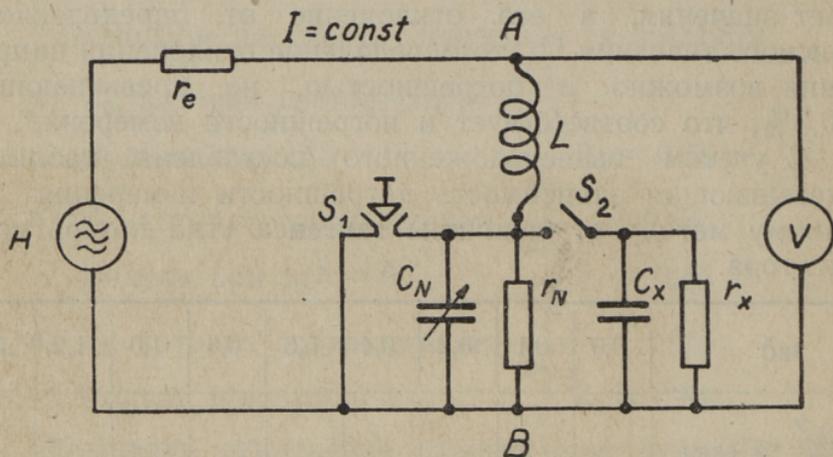


Рис. 5. Принципиальная схема измерительной установки.

двухполюсник, состоящий из градуированного конденсатора переменной емкости, параллельно включенного к нему активного сопротивления r_N и последовательно с обеими включенной катушки L . Напряжение между точками A и B измерялось вольтметром V . При замкнутом положении выключателя S_1 вольтметр измеряет падение напряжения на индуктивности $I\omega L$, а при разомкнутом положении — падение напряжения IZ_0 . Регулируя C_N так, что при обоих положениях выключателя S_1 вольтметр дает одинаковое отклонение, можно будет выполнить равенство $\omega L = \frac{1}{2C\omega_N}$. Пусть величина емкости

конденсатора при этом будет обозначена через C_{N0} . При замыкании S_2 параллельно C_N включается измеряемый образец, общая емкость увеличивается и отклонение вольтметра уменьшается. При подрегулировке конденсатора C_N до достижения прежнего отклонения вольтметра (до положения C_{N1}) суммарная емкость будет равняться

C_{N0} независимо от величины сопротивления r_x . Следовательно

$$C_x = C_{N0} - C_{N1} \quad (5)$$

и определяется непосредственно по конденсатору переменной емкости C_N .

При замкнутом выключателе S_2 производится еще проверка на равенство показаний вольтметра для случаев замкнутого и разомкнутого выключателя S_1 .

По данной схеме проводились измерения при частоте 10 кГц, 20 кГц и 1 мГц. Полученные результаты полностью подтвердили изложенное в п. 2. В нижеследующей таблице приведены погрешности измерения емкости, полученные экспериментально, в зависимости от тангенса угла потерь всего комплекта конденсаторов.

$\text{tg}\delta$	0,08	0,21	0,24	0,34	0,71	1,66	2,60	4,28
$\frac{\Delta C}{C_0} \%$	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,9	2,5	6,9

Точность измерения в большой степени зависит от постоянства частоты питающего генератора. Так как применялись обыкновенные нестабилизированные электронные генераторы, то получились несколько большие погрешности измерения, в особенности при больших значениях $\text{tg}\delta$, нежели это ранее было оценено по точности измерения напряжения. Применяя ламповый генератор с кварцевой стабилизацией, можно предполагать, что достигается указанная в п. 2 точность измерения. Увеличение частоты генератора до 10 и 20 мГц не встречает никаких принципиальных затруднений. Измерительная установка весьма проста и произвести измерения возможно достаточно быстро и легко.

Для нормальной работы измерительного устройства необходимо обеспечить постоянный и синусоидальный ток генератора, высокую стабильность частоты и предотвратить возможности появления колебаний в измерительном двухполюснике (с этой целью в измерительной схеме применено шунтирующее сопротивление r_N).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При последовательном соединении конденсатора с потерями и индуктивности получается двухполюсник, модуль полного сопротивления Z_0 которого не зависит от потерь конденсатора при условии, что а) конденсатор можно заменить параллельной схемой замещения; б) величины емкости и индуктивности удовлетворяют уравнению $\omega L = \frac{1}{2\omega C}$. В то же время модуль Z_0 зависит от величины емкости C .

2. При питании описанного в п. 1 двухполюсника постоянным током, на зажимах его получается напряжение, позволяющее определить соответствующую схеме величину емкости. На основе круговых диаграмм рассмотрена точность измерения емкости и зависимости от тангенса угла потерь конденсатора.

3. Были проведены эксперименты, подтвердившие правильность теоретического анализа.

4. Представлена принципиальная схема измерительного устройства, позволяющая легко и с достаточной точностью измерять емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. ч. II. ГЭИ, 1954.



Цена 35 коп.