



ного контура на пять и выше. Если выбрать емкость образца порядка  $25 \text{ пф}$  и частоту измерений так, чтобы начальная емкость не превышала  $100 \text{ пф}$  (оптимальные условия измерений), и если предположить, что добротность контура при этом порядка  $\sim 200$ , то окажется, что  $\text{tg } \delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ . Случайная ошибка измерений [4] составит около 75%, причем погрешность в отсчете  $\Delta Q$  составляет 68%. Чтобы повысить точность отсчета

$\Delta Q$ , в схему был введен микроамперметр типа ЛМ на  $75 \text{ мка}$  (фиг. 1). Конструктивно прибор был сделан выносным. На переднюю панель куметра был выведен тумблер  $\delta$  и клеммы  $B$ , к которым и подключался выносной прибор А. Шкала прибора была отградуирована по  $Q$  с верхним пределом 250, как и в существующем приборе. Благодаря большим размерам шкалы цена делений выносного прибора составила единицу (вместо 5), а зеркальный подшкальник позволил устранить паралакс при отсчете и повысить точность отсчета до 0,25 цены деления. Если теперь воспользоваться предыдущими данными, то погрешность измерений составит  $\sim 15\%$ .

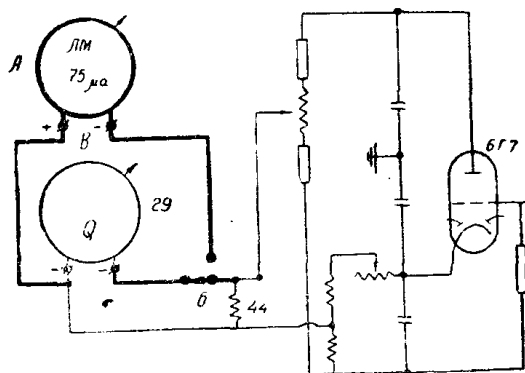
Если же предположить, что в выбранном нами примере разность  $Q_1 - Q_2 = 1$ , что соответствует чувствительности установки, окажется,

$$\text{что } \text{tg } \delta = 10^{-4} \text{ и } \frac{\Delta(\text{tg } \delta)}{\text{tg } \delta} = 55\%.$$

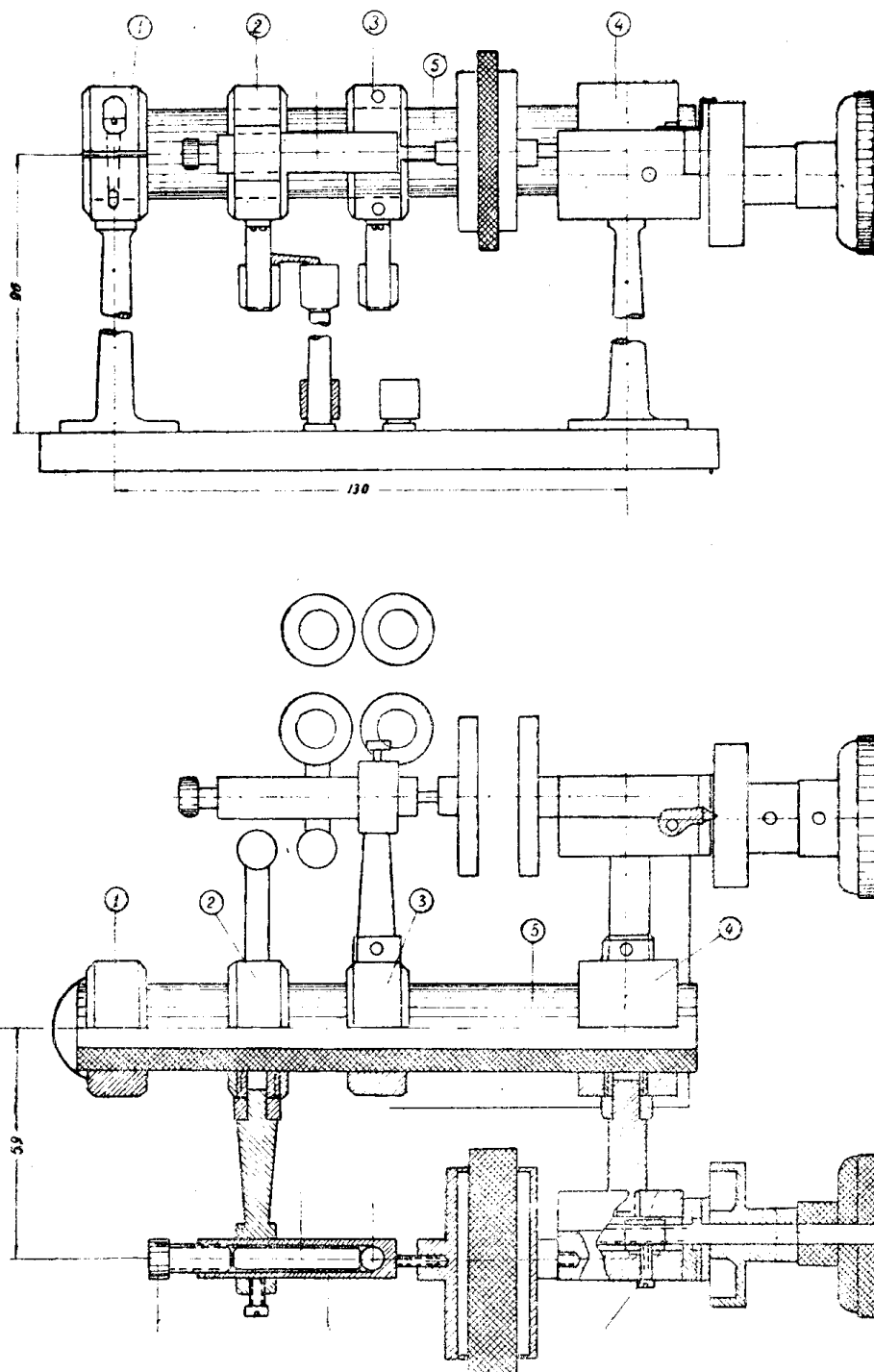
Для снятия частотных и температурных характеристик был изготовлен специальный держатель, состоящий из двух симметричных конденсаторов, укрепленных на кварцевой трубке (фиг. 2). Перед измерением держатели симметрировались, т. е. начальные емкости  $C'_a$   $C''_a$  левого и правого держателей уравнивались относительным перемещением несущих обойм (3) и (2).

После симметрирования в правый конденсатор вставляется измеряемый образец, а между пластинами левого конденсатора устанавливается зазор  $d$ , равный толщине образца. Диаметры электродов обоих конденсаторов равны. Электроды правого конденсатора делались чашечными и заполнялись ртутью для работы при комнатной температуре или сплавом Вуда для работы при повышенных температурах.  $Q_1$  измерялось с подключенным левым конденсатором (воздушным),  $Q_2$  — с подключенным правым конденсатором (с образцом). Считая геометрические емкости правого и левого конденсаторов равными, можно найти емкость образца  $C_x$ , как разность отсчета емкости по куметру, и вычислить  $\text{tg } \delta$  образца. Так как эта операция повторяется в каждой частотной точке, то частотная зависимость держателя исключается. По крайней мере погрешность за счет влияния держателя значительно меньше погрешности прибора.

При измерении температурной зависимости  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  на конденсатор с образцом одевался кварцевый стакан с вделанным в дно электронагревателем. Чтобы учесть влияние держателей, измерялась зависимость  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  правого конденсатора с воздушным диэлектриком. Эта зависимость учитывалась при исследовании диэлектрика.



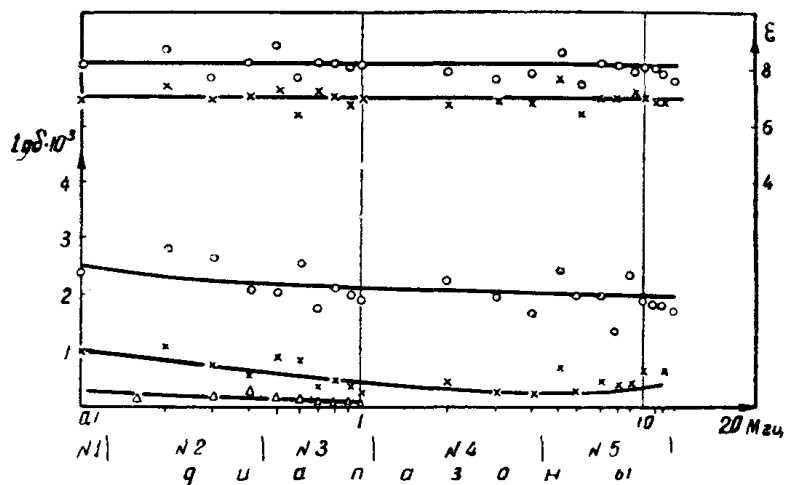
Фиг. 1. Схема включения выносного прибора. Жирной линией показаны дополнительные цепи и детали



Фиг. 2. Конструкция держателя.

1. Передняя стойка. 2. Измерительный конденсатор с исследуемым диэлектриком,  $C_d''$ . 3. Эталонный воздушный конденсатор,  $C_d'$  4. Задняя стойка с микрометрическими головками. 5. Толстостенная кварцевая трубка

Анализ частотной зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$ , снятой для микалекса, стеатитовой керамики М4 и слюды (фиг. 3), показал, что точность прибора не одинакова с изменением частоты. В начале каждого диапазона, когда емкость куметра велика (400—200 пф), а  $\Delta Q$  мало ( $\sim 1 \div 2$ ), разброс значений  $\operatorname{tg} \delta$  наибольший. С уменьшением емкости куметра ( $C \leq 150 \div 100$  пф)  $\Delta Q$  увеличивается до нескольких единиц и разброс значений  $\operatorname{tg} \delta$  становится небольшим.



Фиг. 3. Частотная зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$ .  
о — микалекс, х — керамика М-4,  $\Delta$  — слюда мусковит.

На фиг. 3 видно, что, если в начале каждого частотного диапазона разброс измерений достигает 10% для  $\epsilon$  и 30—50% для  $\operatorname{tg} \delta$ , то в конце диапазона разброс не превышает 3% для  $\epsilon$  и 10% для  $\operatorname{tg} \delta$ . Объясняется это, по-видимому, двумя причинами. Во-первых, высоким коэффициентом гармоник генератора в начале диапазона [2]. Во-вторых, тем, что  $\Delta Q$  измеряется разностью двух больших величин ( $Q \approx 200$ ,  $\Delta Q \approx 2$ ). Поэтому относительная ошибка отсчета  $\Delta Q$  уменьшается к концу диапазона.

То же самое можно сказать и относительно погрешности в измерении  $\epsilon$ . Так как  $\epsilon$  пропорционально емкости образца  $\Delta C = C_1 - C_2$ , то в начале диапазона, при больших емкостях  $C_1$  и  $C_2$  и малом  $\Delta C$ , относительная погрешность измерения  $\epsilon$  больше, чем в конце, где  $C_1$  становится сравнимой с  $\Delta C$ . Кроме того, при вычислении вносится погрешность порядка 1% за счет измерения геометрических размеров образца. Сверху частотный диапазон ограничен тем, что, начиная с частоты 10 Мгц, куметр начинает работать нестабильно, и при работе на чувствительном выносном приборе настройка резонанса крайне затруднительна. Предельная частота измерений тем меньше, чем меньше потери в образце.

Образцы с  $\operatorname{tg} \delta \approx 5 \cdot 10^{-3}$  удалось замерить на частоте  $2 \cdot 10^7$  гц.

Исходя из всего изложенного, при измерении температурных зависимостей  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  размеры образца и частота генератора выбирались так, чтобы начальная емкость  $C_1$  оказалась минимально возможной. Емкость различных образцов выбиралась в пределах 15—80 пф, поэтому можно было выбрать  $C_1 \approx 100$  пф на частоте  $10^6$  гц. Эта частота была, кроме того, выбрана и для удобства сравнения с результатами измерения на других установках.

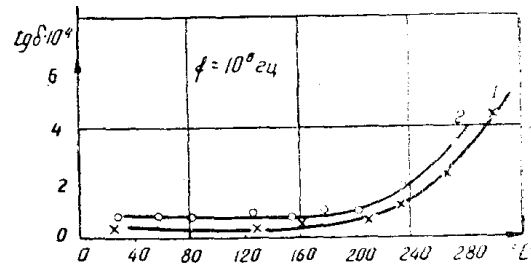
На фиг. 4 представлена температурная зависимость для плавленого кварца. Кривая 1 получена на резонансной установке методом

замещения [5]. Кривая 2 получена на куметре. Так как потери в кварце малы, то приходится учитывать потери в держателе [3].

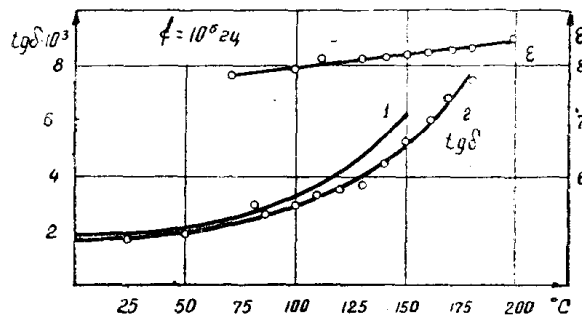
На фиг. 5 дана зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  от температуры для микалекса. Результаты, полученные на куметре (кривая 2), хорошо совпали с данными Богородицкого и Фридберга [6] (кривая 1). Аналогичные результаты получены для слюды и керамики. Несовпадение абсолютных значений, полученных различными методами, объясняется, очевидно, систематическими ошибками установок.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что результаты, полученные на куметре после произведенных усовершенствований, совпадают с результатами измерений другими методами. Погрешность измерений при значении  $\operatorname{tg} \delta \sim 10^{-4}$  не превышает погрешности других методов, а при правильном выборе емкости образца  $\Delta C$ , начальной емкости куметра  $C_1$  и частоты может быть значительно меньше.

В заключение необходимо отметить, что примененная в куметре КВ-1 низкоомная инжекция энергии в измерительный контур не позволяет получить более высокую точность измерений. Связано это с тем, что предполагаемая пропорциональность инжектируемого напряжения току, протекающему через малое сопротивление инжекции  $r$ , будет иметь место только в том случае, если  $r$  полностью безреактивно. Имеющая в действительности место реактивность сопротивления инжекции приводит к зависимости  $r$  от частоты.



Фиг. 4. Температурная зависимость для плавленого кварца.  
1. Метод замещения. 2. Куметр с учетом поправки на держатель.



Фиг. 5. Температурная зависимость для микалекса.  
1. По Богородицкому и Фридбергу. 2. Измеренные на усовершенствованном куметре.

С повышением частоты и коэффициента гармоник генератора напряжение инжекции при неизменном токе не остается неизменным и, следовательно, точность градуировки шкалы  $Q$  нарушается.

Это один из основных источников ошибок. Избавиться от него можно только перейдя к другим методам инжекции и непосредственному измерению напряжения инжекции с помощью лампового вольтметра. Для снижения коэффициента гармоник и повышения стабильности целесообразно выполнить генератор с мощным буферным каскадом и маломощным задающим генератором.

Кроме того, необходимо устранить паралакс при отсчетах по шкалам куметра и повысить точность градуировки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bigs A. J., Novldin J. E. Измерение куметром полных сопротивлений Р. I. R. E., т. 3, № 12, 1949.
2. Грохальский А. А. Разработка метода и аппаратуры поверки измерителя добротности. Технический отчет. Государственный институт мер и измерительных приборов, Новосибирск, 1956.
3. Шелюбский В. И., Инденбом В. Л. Применение куметра для измерения емкости, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь на высокой частоте. Заводская лаборатория, № 6, ст. 713, 1954.
4. Сканава Г. И. Диэлектрические потери и поляризация в стеклах и керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Госэнергоиздат, 1952.
5. Водопьянов К. А. и Ивлев В. Ф. Усовершенствование метода замещения для измерения малых углов диэлектрических потерь, ЖТФ 8, 1521, 1938.
6. Богородицкий Н. П. и Фридберг И. Д. Высокочастотные неорганические диэлектрики, Сов. радио, 1948.