

12

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

И.Г.Макаров, Б.З.Персов

**О ПЕРЕХОДНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ
РАЗЪЕМНЫХ КОНТАКТОВ С ИНДИЕВОЙ
ПРОКЛАДКОЙ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ**

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 15

Новосибирск

И.Г.Макаров, Б.З.Персов

О ПЕРЕХОДНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ РАЗЪЕМНЫХ КОНТАКТОВ
С ИНДИЕВОЙ ПРОКЛАДКОЙ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

А н н о т а ц и я

Проведены измерения переходного сопротивления разъемных контактов типов "медь-медь" и "медь-индий-медь" на высокой частоте и показаны преимущества контакта с индиевой прокладкой.

Описана схема измерений и сделана оценка наибольшей возможной относительной погрешности определения переходного сопротивления.

Разъемные электрические контакты широко применяются в электрофизических установках, в том числе и в различных ВЧ- и СВЧ-устройствах. Разработка конструкций контактных элементов предполагает, как правило, решение задачи обеспечения достаточно малого переходного сопротивления в сочетании с конструктивной простотой и удобством в обслуживании.

В то время, как работа разъемных контактов на постоянном токе достаточно хорошо изучена, и в литературе имеется много рекомендаций по расчету и конструированию таких элементов [1, 2, 3 и др.], данные о величине переходного сопротивления контактов на высокой частоте в литературе встречаются весьма редко и, кроме того, часто существенно отличаются друг от друга (как, например, в работах [4] и [5]).

В связи с этим была проведена работа по определению величины переходного сопротивления на высокой частоте при контактировании двух медных поверхностей и тех же поверхностей с индиевой прокладкой между ними. Для этой цели был изготовлен медный резонатор (рис. 1.), части которого соединялись при помощи двенадцати шпилек М10, затягиваемых тарированным ключом. Поверхность контакта каждой половины резонатора представляла собой плоское кольцо с внутренним диаметром 190,3 мм при ширине 4 мм. Качество обработки поверхностей резонатора, в том числе и контактных, соответствовало среднему арифметическому отклонению профиля $R_a \approx 0,63 \dots 1,25$ мкм. Неплоскостность контактных поверхностей не превышала 0,03 мм. В резонаторе возбуждались колебания типа E_{D10} на частоте $f_0 = 1207$ МГц.

При различных усилиях стягивания измерялась ширина полосы пропускания ($f_B - f_H$), по которой рассчитывалась добротность резонатора

$$Q = \frac{f_0}{f_B - f_H} \quad (1)$$

где f_0 - резонансная частота, равная 1207 МГц;
 f_H и f_B - частоты нижней и верхней точек половинной мощности.

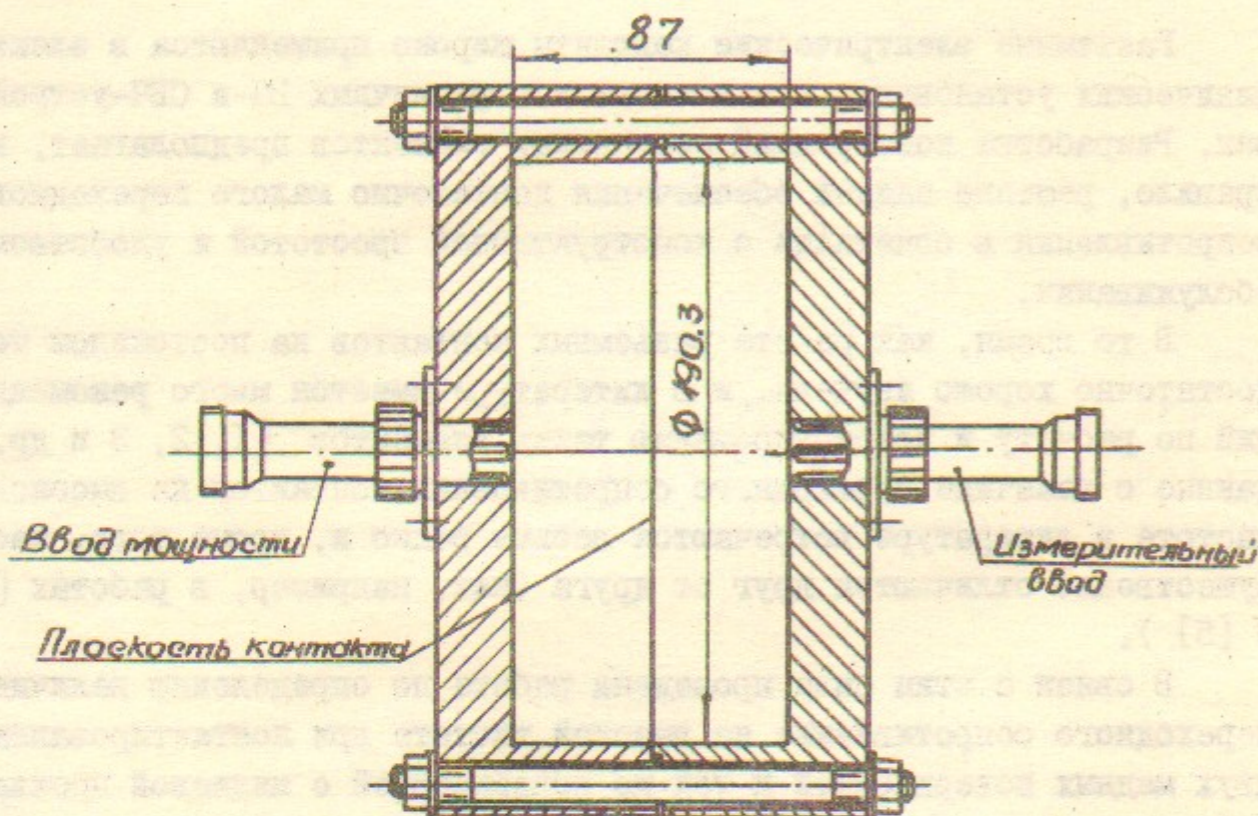


Рис. 1. Резонатор для определения переходного сопротивления

При этом сначала испытывался резонатор с контактом "медь-медь" а затем - с контактом через индиевую прокладку. В качестве прокладки использовалась индиевая проволока ϕ 0,6 мм, которая при затягивании шпилек расплющивалась до толщины (в конце испытаний) ~50... .. 60 мкм. Для центрирования проволоки одна из контактных поверхностей имела кольцевую канавку шириной 0,4 мм и глубиной 0,3 мм.

Вклад в переходное сопротивление контакта медь-индий-медь собственного сопротивления индиевой прокладки весьма невелик. Так, при глубине скинслоя в индии на частоте 1207 МГц ~ 4 мкм и наибольшей толщине прокладки в стянутом состоянии ~ 0,1 мм сопротивление индиевой прокладки на длине контактной линии в 1 м имеет величину ~ 10^{-6} Ом, тогда как величина удельного переходного сопротивления контакта, как будет показано ниже, составляет ~ 10^{-4} Ом.м.

Чтобы учесть неизвестное влияние на добротность шероховатости поверхностей деталей резонатора, в дальнейшем была измерена добротность этого же резонатора, но запаянного по плоскости контакта припоем ПСр72.

Определяя добротность резонатора, как

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_1}$$

где W - энергия, запасенная в резонаторе;

W_1 - энергия потерь за период,

для добротности цилиндрического резонатора при типе колебаний E_{010} получим:

а) добротность идеального резонатора без контактов:

$$Q_0 = \frac{ha}{\Delta_0(h+a)} \quad (2)$$

б) добротность реального резонатора без контактов:

$$Q = \frac{ha}{\Delta(h+a)} \quad (3)$$

в) добротность реального резонатора с n контактами на наружном диаметре:

$$Q_k = \frac{ha}{\Delta(h+a) + \frac{n R'_{kfo}}{\pi f_0 \mu_0}} \quad (4)$$

где: h и a - соответственно высота и радиус резонатора, м;

Δ_0 - глубина скинслоя, м, на частоте f_0 Гц;

Δ - приведенная глубина скинслоя, м, учитывающая наличие в реальном резонаторе шероховатости поверхностей;

n - число контактов (в нашем случае $n=1$);

$\mu_0 = 0,4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

R'_{kfo} - удельное переходное сопротивление контакта, Ом.м.

Определяя из выражений (3) и (4) величину R'_{kfo} с учетом значения Δ , определяемого из выражений (2) и (3), получаем формулу для расчета удельного переходного сопротивления контакта по известным добротностям Q_0 , Q и Q_k :

$$R'_{kfo} = \frac{\Delta(h+a)}{n} \pi f_0 \mu_0 \frac{Q_0}{Q} \left(\frac{Q}{Q_k} - 1 \right) \quad (5)$$

В выражении (5) Q_0 - расчетная добротность идеального резона-

тора, равная

$$Q_0 = 24800,$$

Q — измеренная добротность реального резонатора без разъемных контактов (запаивного), равная

$$Q = 21100,$$

Q_k — измеряемая при различных усилиях стягивания контакта добротность реального резонатора с контактом.

Добротности Q и Q_k определялись по выражению (1) по результатам измерения величин f_0 , f_b и f_n . Измерения проводились по схеме, изображенной на рис. 2.

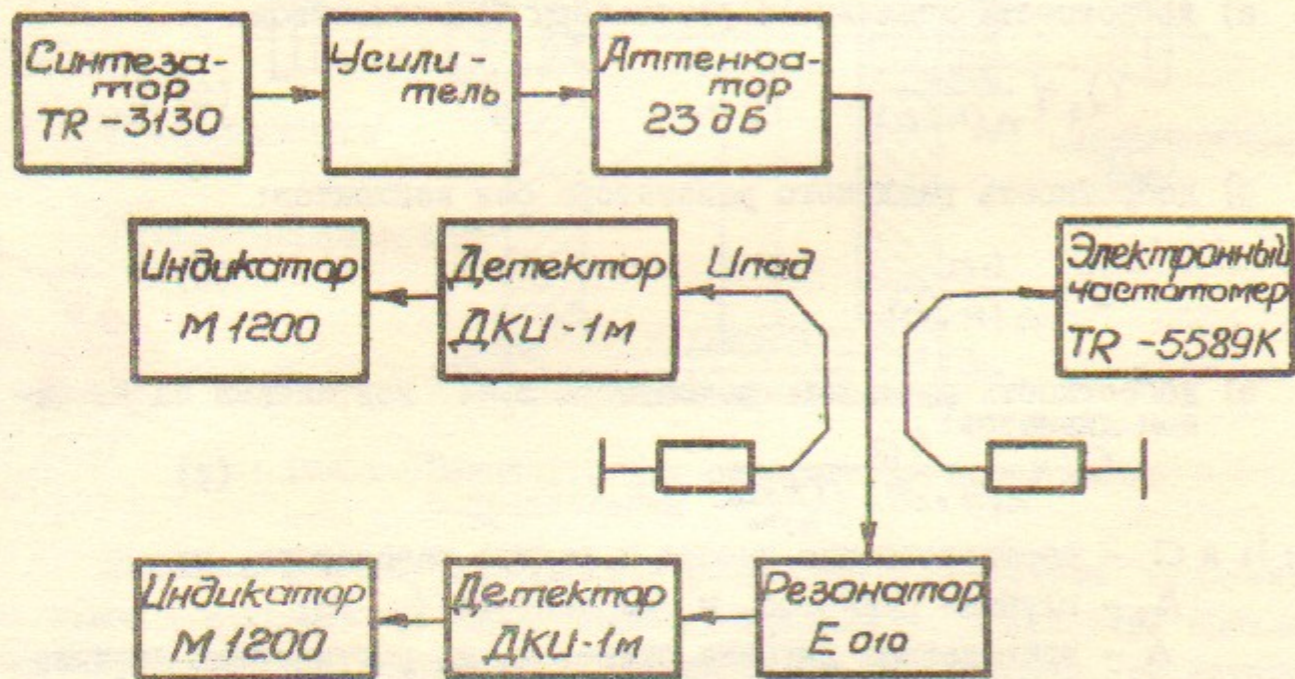


Рис. 2.

Погрешность определения R'_{kfo} по формуле (5) равна

$$\frac{\Delta R'_{kfo}}{R'_{kfo}} = d[\ln R'_{kfo}(Q, Q_k)] = \frac{\Delta Q}{Q} \cdot \frac{1}{\frac{Q}{Q_k} - 1} - \frac{\Delta Q_k}{Q_k} \cdot \frac{1}{\frac{Q}{Q_k} - 1} \quad (6)$$

Эта погрешность при измерении по схеме, приведенной на рис. 2, определяется следующими факторами (ϵ_i — систематические погрешности, δ_i — случайные):

- 1) шунтирующим действием элементов связи с резонатором $\epsilon_{св}$;
- 2) изменением отражения при расстройке генератора ϵ_r ;
- 3) погрешностью определения добротности в связи с неточностью калиб-

ровки детектора ϵ_d ;

4) погрешностью отсчета по гальванометру (индикатор М1200) $\delta_{и}$;

5) нестабильностью выходной мощности генератора δ_r ;

6) нестабильностью частоты генератора δ_f .

Пренебрегая ввиду их малости величинами $\epsilon_{св} \approx 10^{-3}$, $\epsilon_r \approx 10^{-3}$, $\delta_r \approx 10^{-4}$ и $\delta_f \approx 10^{-9} \frac{1}{\text{час}}$, получаем выражения для систематической и случайной погрешностей определения переходного сопротивления контакта:

$$\epsilon_R = \epsilon_Q \frac{1}{\frac{Q}{Q_k} - 1} - \epsilon_{Q_k} \frac{1}{\frac{Q}{Q_k} - 1}$$

$$\delta_R = \sqrt{\delta_Q^2 \frac{1}{\left(\frac{Q}{Q_k} - 1\right)^2} + \delta_{Q_k}^2 \frac{\left(\frac{Q}{Q_k}\right)^2}{\left(\frac{Q}{Q_k} - 1\right)^2}}$$

Полагая $\epsilon_Q = \epsilon_{Q_k}$ и $\delta_Q = \delta_{Q_k}$, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_R &= \epsilon_Q \\ \delta_R &= \delta_Q \sqrt{\frac{\left(\frac{Q}{Q_k}\right)^2 + 1}{\left(\frac{Q}{Q_k} - 1\right)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Входящие в последние зависимости величины ϵ_Q и δ_Q могут быть выражены через перечисленные выше составляющие погрешностей. Так,

$$\epsilon_Q = \epsilon_d \quad (7')$$

а значение δ_Q раскроем следующим образом.

Мощность, подводимая к детектору при расстройке $f_1 - f_0$ относительно резонанса, равна

$$P = \frac{P_0}{1 + (2Q \frac{f_1 - f_0}{f_0})^2}$$

где P_0 — мощность, подводимая к детектору при резонансе;
 Q — добротность.

При использовании квадратичного участка вольтамперной характе-

ристки детектора отклонение луча гальванометра запишется аналогично, то-есть

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + (2Q \frac{f_1 - f_0}{f_0})^2}$$

где α_0 - отклонение луча при резонансе;

α - отклонение луча при расстройке ($f_1 - f_0$) относительно резонанса.

Дифференцирование последнего выражения приводит к соотношению:

$$\left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta f_1} \right| = \frac{4 \alpha_0 Q}{f_0 [1 + (2Q \frac{f_1 - f_0}{f_0})^2]}$$

которое для точек половинной мощности, где $2Q \frac{f_1 - f_0}{f_0} = 1$, принимает вид:

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta f} = \frac{\alpha_0 Q}{f_0} = \frac{\alpha_0}{f_B - f_H}$$

откуда $\Delta f = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} (f_B - f_H)$

где Δf - погрешность определения частоты в точках половинной мощности. С другой стороны, на основании (1)

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q} = d[\ln Q] \approx \frac{2 \Delta f}{f_B - f_H}$$

откуда после подстановки значения Δf получаем:

$$\delta_Q = 2 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} = 2 \delta_H$$

и, соответственно,

$$\delta_R = 2 \delta_H \sqrt{\frac{(\frac{Q}{Q_K})^2 + 1}{(\frac{Q}{Q_K} - 1)^2}} \quad (7'')$$

Оценивая величину погрешности, связанной с неточностью калибровки детектора, как $\xi_A \approx \pm 2\%$, имеем в соответствии с (7):

$$\xi_R = \xi_Q = \xi_A \approx \pm 2\%$$

Входящая в выражение (7'') погрешность отсчета по гальванометру складывается из его вариаций и неточности визуального отсчета. В нашем случае использовался зеркальный гальванометр на кварцевых растяжках, имеющий вариации в пределах $\pm 0,1\%$. Оценивая неточность визуального отсчета в $\pm 0,3\%$ получим

$$\delta_H \approx \pm 0,4\%$$

Максимального значения величина δ_R , как следует из (7''), достигает при наименьшем значении отношения Q/Q_K . В соответствии с результатами измерений, приведенными в таблицах 1 и 2 (в виде добротностей, рассчитанных по (1)) минимум Q/Q_K имеет место в случае контакта "медь-

--индий-медь" при наибольшем усилии стягивания и равен

$$\left| \frac{Q}{Q_K} \right|_{\min} = \frac{21100}{18850} \approx 1,12$$

Контакт медь-медь

Табл. I.

Усилие стяги- вания P [Н]	9500	14250	19000	23750	28500	33250	38000	42750	47500
Контакт- ное дав- ление, q x 10 ⁵ Па	4I	6I	8I,5	102	122	142,5	163	183	203,5
Доброт- ность Q _K	17140	17200	17600	17720	17820	17840	18100	18030	18170

Контакт медь-индий-медь

Табл. 2.

Усилие стяги- вания P [Н]	3400	6800	10200	13600	17000	20400
Погон- ное уси- лие q x 10 ⁴ Па	0,56	1,12	1,68	2,24	2,8	3,36
Доброт- ность Q _K	18510	18710	18860	18830	18830	18850

Подставляя полученные значения δ_H и $\left| \frac{Q}{Q_K} \right|_{\min}$ в (7''), получаем величину случайной погрешности определения переходного сопротивления $\delta_R \approx \pm 10\%$.

Таким образом, суммарная наибольшая относительная погрешность определения удельного переходного сопротивления контакта в нашем случае составляет $\frac{\Delta R_{Kf_0}}{R_{Kf_0}} = \xi_R + \delta_R \approx \pm 12\%$

Зависимость удельного переходного сопротивления контактов при частоте 1207 МГц от контактного давления q [Па] (для контакта "медь-медь") и от погонного усилия q_e [Н/мм] (для контакта "медь-индий-медь") представлена на рис.3.

Так как работа выполнялась с целью оценки качества разъемных контактов в резонаторах импульсного гирокона, работающего на частоте f = 430 МГц, то величины удельного контактного сопротивления, расчи-

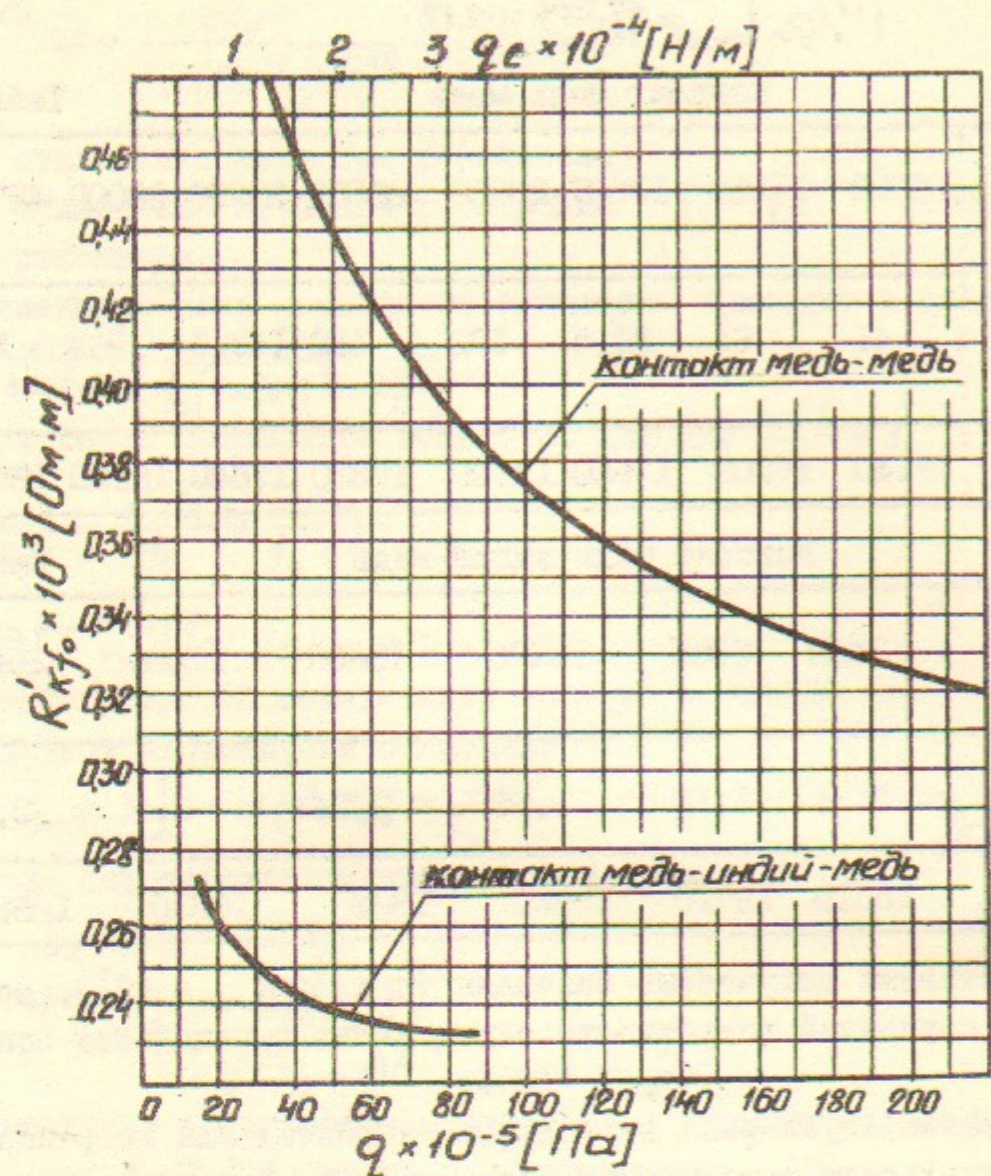


Рис.3. Удельное переходное сопротивление контактов "медь-медь" и "медь-индий-медь" на частоте 1207 МГц

танние по выражению (5), пересчитывались на эту частоту, как

$$R'_{kf} = R'_{kf_0} \sqrt{f/f_0}$$

Контактное сопротивление обоих типов контактов при частоте $f = 430$ МГц в зависимости от усилия стягивания представлено на рис.4.

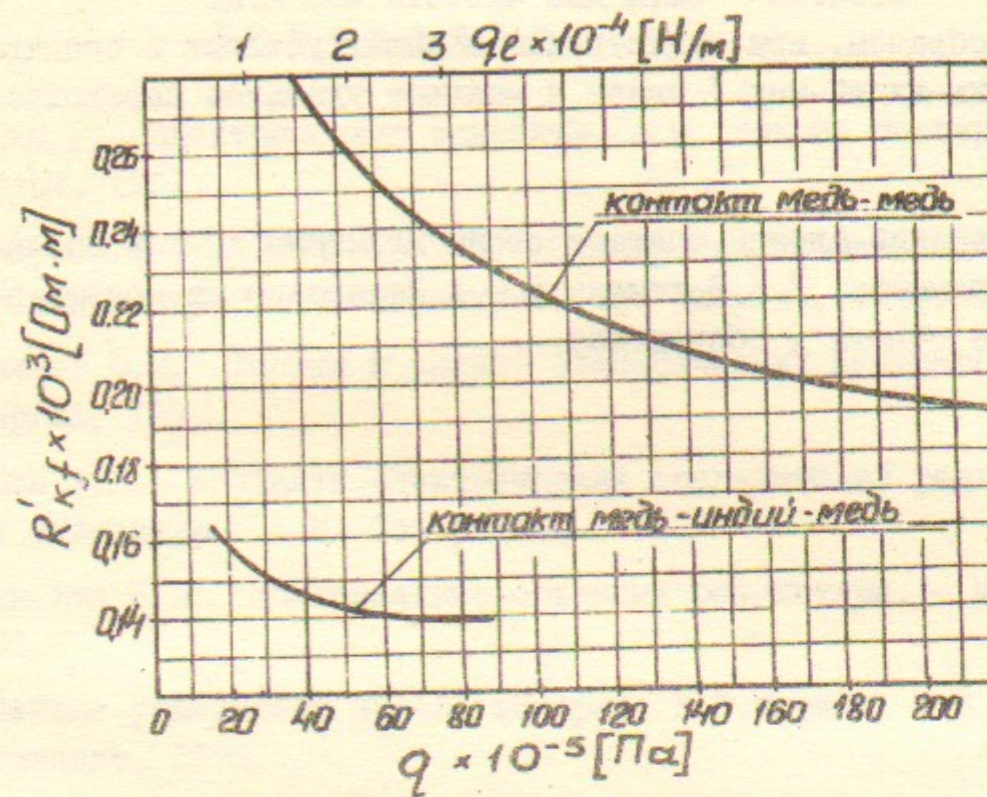


Рис.4. Удельное переходное сопротивление контактов "медь-медь" и "медь-индий-медь" на частоте 430 МГц

Строго говоря, при пересчете сопротивления на другую частоту следует учитывать изменение отношения высоты микронеровностей к глубине скин-слоя. Однако поправка, вносимая при этом в результат достаточно мала [6]; в частности, в нашем случае она не превышает (2...4)%.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

а) переходное сопротивление контакта "медь-медь" с увеличением контактного давления быстро снижается до давления $q \approx 120 \cdot 10^5$ Па, после чего темп уменьшения заметно снижается. Величина удельного переходного сопротивления контакта при указанном давлении для частот 1207 МГц и 430 МГц составляет соответственно $\sim 0,36 \cdot 10^{-3}$ Ом.м и $\sim 0,215 \cdot 10^{-3}$ Ом.м;

б) переходное сопротивление контакта "медь-индий-медь" резко снижается до значений погонного усилия: $q_e = (1,5 \dots 1,7) \times 10^4 \frac{H}{m}$ (соответствует контактному давлению $q = (39 \dots 44) \times 10^5$ Па), после чего почти не меняется, оставаясь равным $\sim 0,24 \cdot 10^{-3}$ Ом.м для частоты

1207 МГц и $\sim 0,14 \cdot 10^{-3}$ Ом, м для частоты 430 МГц.

Таким образом, при существенно меньших усилиях в соединении контакт "медь-индий-медь" имеет и меньшее удельное переходное сопротивление.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить М.М.Карлинера, И.А.Шехтмана и О.А.Нежевенко за помощь в работе, полезные советы и обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. Хольм Р. Электрические контакты. - М: Изд-во иностранной литературы, 1961.
2. Белоусов А.К., Савченко В.С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. - М: Энергия, 1967.
3. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. - Л: Энергия, 1972.
4. Левин А.П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. - М: Сов.радио, 1972.
5. Плодухин Б.В. Коаксиальные объемные резонаторы. - М: Сов.радио, 1956.
6. Линейные ускорители ионов, под ред. Б.И.Мурзина, т.2. - М: Атомиздат, 1978.