

В. В. ЕГОРШИН, Б. Я. ЛИХТЦИНДЕР

**ДВУХЧАСТОТНЫЙ МОСТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ**

В настоящее время все большее распространение получают объекты измерения, характеризующиеся числом независимых выходных зажимов  $p > 2$ . К подобным объектам можно отнести транзисторы, трансформаторы, различные микромодульные схемы и т. д. Мостовые электронизмерительные цепи для измерения параметров указанных электрических многополюсников являются обобщением известных мостовых цепей для измерения комплексных сопротивлений  $z$  и проводимостей  $y$  линейных двухполюсников [1].

Наибольший интерес представляют схемы, предназначенные для измерения параметров четырехполюсников. В системе узловых потенциалов линейный четырехполюсник (рис. 1а) аналитически описывается уравнениями:

$$\begin{cases} I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2 \\ I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2 \end{cases} \quad (1)$$

Обобщенная мостовая цепь для измерения  $Y$ -параметров четырехполюсников с полюсами 1' и 2', объединенными в один базисный узел, представлена на рис. 1б.

Условие равновесия данной мостовой цепи имеет следующий вид [2]:

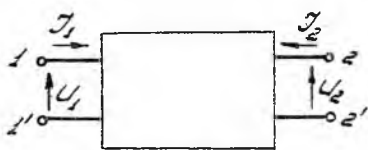
$$Y_x = Y_k Y_{nc}^{-1} Y_{va},$$

где

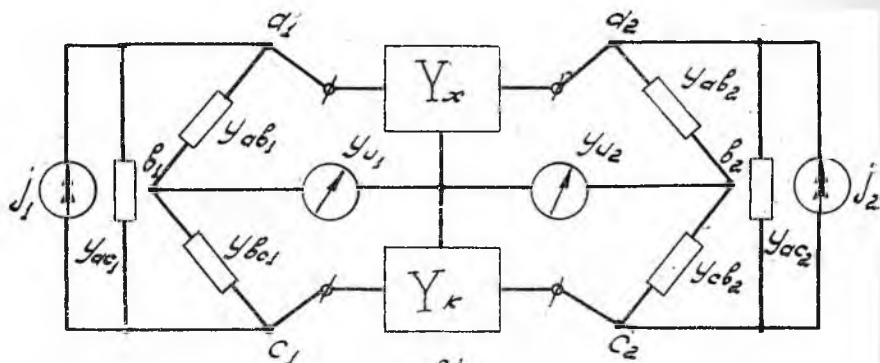
$$Y_{vc} = \begin{bmatrix} -y_{cv_1} & 0 \\ 0 & -y_{cv_2} \end{bmatrix}; \quad Y_{va} = \begin{bmatrix} -y_{av_1} & 0 \\ 0 & -y_{av_2} \end{bmatrix};$$

$$Y_x = \begin{bmatrix} y_{x_{11}} & y_{x_{12}} \\ y_{x_{21}} & y_{x_{22}} \end{bmatrix}; \quad Y_k = \begin{bmatrix} y_{k_{11}} & y_{k_{12}} \\ y_{k_{21}} & y_{k_{22}} \end{bmatrix}.$$

Для уравнивания данной цепи необходимо два независимых режима питания, поскольку каждый из режимов позволяет получить 2 уравнения (1), содержащих четыре неизвестных параметра. Решение может быть получено либо поочередным включением источников  $j_1$  и  $j_2$ , либо путем их одновременной рабо-



a)



b)

Рис. 1.

ты на разных частотах. В первом случае имеет место временное разделение каналов уравнивания, во втором — частотное.

Так как принцип суперпозиции применим только для линейных цепей, очевидно, что частотное разделение каналов уравнивания возможно в том случае, когда объектом измерения является линейный четырехполюсник.

В качестве примера рассмотрим мостовую измерительную цепь для контроля величин пленочных емкостей гибридных микросхем.

Известно [3], что указанные емкости в большинстве случаев зашунтированы резистивными проводимостями (рис. 2). Матрица проводимостей такого четырехполюсника имеет следующий вид:

$$Y_x = \begin{bmatrix} \left( \frac{1}{R_{1x}} + j\omega C_x \right) & -j\omega C_x \\ -j\omega C_x & \left( j\omega C_x + \frac{1}{R_{2x}} \right) \end{bmatrix}$$

Таким образом, взаимные проводимости матрицы  $y_{12}$  и  $y_{21}$  равны между собой и равны проводимости измеряемой емкости.

Функциональная схема двухчастотного трансформаторного моста представлена на рис. 3.

Независимые режимы питания задаются генераторами  $G_1$  и  $G_2$ , настроенными следующим образом:

$$f_1 = 250 \text{ кГц};$$

$$f_2 = f_1 + \Delta f$$

$$\Delta f \approx 300 \pm 400 \text{ Гц}$$

Принято, что:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$$

тогда:

$$Y_{вс} = Y_{ва}$$

и условие равновесия схем принимает следующий вид:

$$Y_x = Y_k.$$

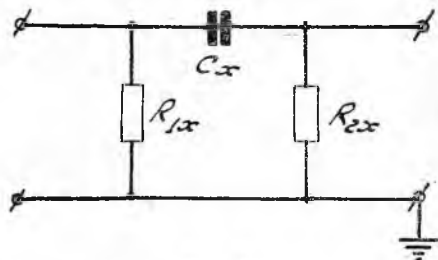


Рис. 2.

Измерительная цепь каждой половины схемы состоит из усилителя  $Ус_1$  ( $Ус_2$ ) с малым входным сопротивлением и двух синхронных детекторов  $СД_{11}$  и  $СД_{12}$  ( $СД_{21}$  и  $СД_{22}$ ), управляемых синхронизирующими по фазе сигналами с генераторов  $G_1$  и  $G_2$ .

Наличие 4-х синхронных детекторов с нуль-индикаторами позволяет одновременно контролировать и измерять все четыре  $Y$ -параметра исследуемого четырехполюсника. Очевидно, что указанная схема может применяться для контроля параметров четырехполюсников как с обратимой ( $y_{12} = y_{21}$ ), так и необратимой матрицей проводимостей.

В рассматриваемом случае необходим контроль только трех параметров. Поэтому измерительная цепь  $СД_{12}$ — $И_{12}$  ( $СД_{21}$ — $И_{21}$ ) может быть исключена из схемы.

Балансировка моста проводится сначала по взаимным проводимостям  $y_{12}$  ( $y_{21}$ ) при помощи переменной емкости  $C_k$ . Контроль равновесия ведется по нуль-индикатору  $И_{12}$  ( $И_{21}$ ). Затем по индикаторам  $И_{11}$  и  $И_{22}$  балансируются входные проводимости  $y_{11}$  (резистором  $R_{1к}$ ) и  $y_{22}$  (резистором  $R_{2к}$ ).

Если в процессе регулировки входных проводимостей показания  $И_{12}$  ( $И_{21}$ ) становятся отличными от нуля, то цикл измерения повторяют до тех пор, пока показания всех нуль-индикаторов не станут равными нулю.

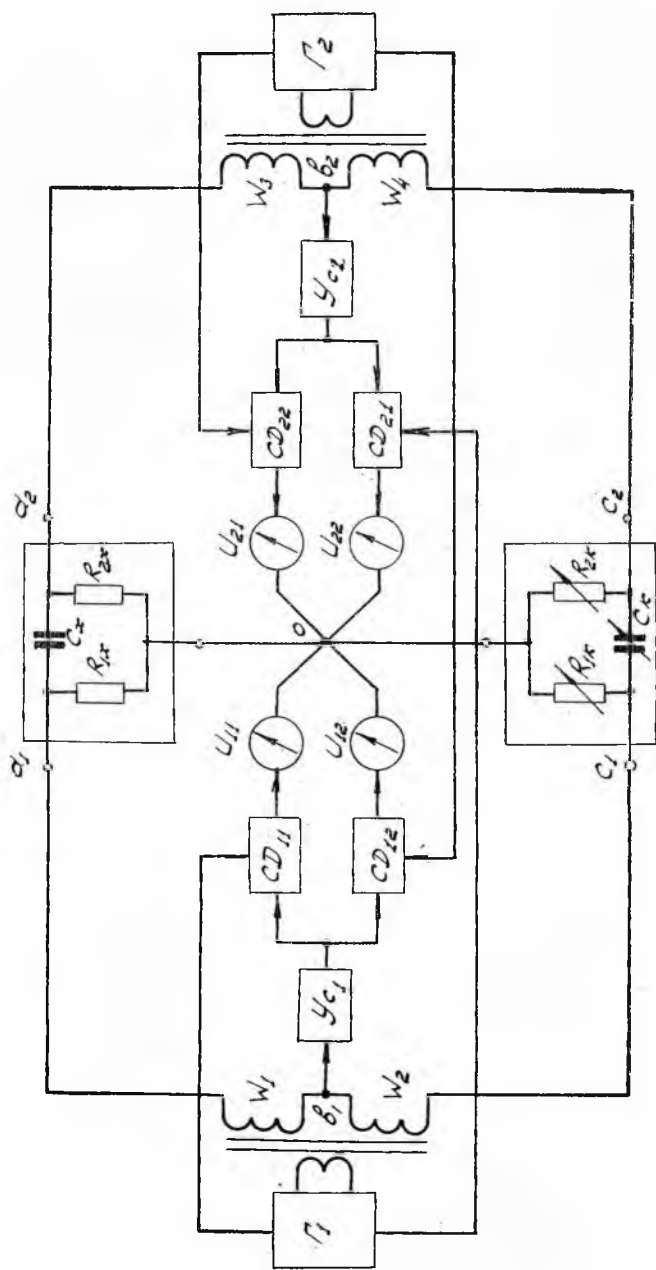


Рис. 8.

Проведенный эксперимент показывает, что при диапазоне измерения емкостей  $500 \div 2000 \text{ пф}$  и значениях шунтирующих проводимостей  $0,002 - 0,001 \frac{1}{\text{ом}}$  процесс балансировки заканчивается после 2-х  $\div$  3-х циклов регулирования. При этом погрешность в измерении емкости  $C_x$  составляет 2  $\div$  3 %, что вполне достаточно при проведении экспериментов по обработке пленочных микросхем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Я. Лихтциндер. Многомерные мостовые цепи. Изв. вузов, т. XII, № 5, Изд. ЛИТМО, Ленинград, 1969.
  2. Б. Я. Лихтциндер. Обобщенный анализ электроизмерительных цепей сравнения. Лекции по курсу «Основы информационно-измерительной техники» КИТИ, Куйбышев.
  3. В. И. Дьячков. Прибор для измерения пленочных емкостей. Изв. вузов, т. XII, № 7, Изд. ЛИТМО, Ленинград, 1969.
-