

мерения и интегральной оценки ряда параметров, функционально связанных с перемещением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. Изд. «Наука», 1967.
2. Шварц С. Полупроводниковые схемы. ИИЛ, М., 1962.
3. Пшеничников Ю. В. Некоторые вопросы теории и применения генераторных сравнивающих устройств на полупроводниковых приборах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н. г. Куйбышев, 1967.
4. Под ред. Штерка М. Д. Расчет и проектирование импульсных устройств на транзисторах. Изд. «Советское радио», 1964.

Ю. П. КИРИН, А. Г. РЫЖЕВСКИЙ

## ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Стремление повысить быстродействие устройств для измерения составляющих комплексных сопротивлений обуславливает не только совершенствование известных структур, но и поиск новых принципов построения измерительных устройств. Одним из способов повышения является применение время-импульсного преобразования исследуемых параметров в цифровую форму на основе использования переходных процессов в измерительной цепи [1, 2, 3]. Сущность способа состоит в преобразовании в установившемся и переходном режимах напряжения  $U_x$  на средней точке измерительной цепи (рис. 1), состоящей из калиброванного элемента и исследуемого комплексного сопротивления в два временных интервала  $t_1$  и  $t_2$ , пропорциональных величинам составляющих исследуемого комплексного сопротивления.

Временной интервал  $t_1$  получаем при подаче опорного воздействия в виде единичного скачка напряжения  $E_0$  путем преобразования  $U_x$  в установившемся режиме с помощью линейной развертки, а временной интервал  $t_2$  — в переходном режиме при снятии  $E_0$  путем измерения постоянной времени измерительной цепи. Этот способ

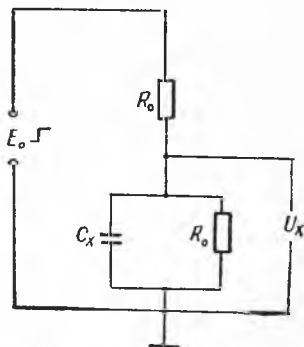


Рис. 1. Измерительная цепь время-импульсного преобразователя параметров параллельной  $R_x C_x$  цепи

измерения составляющих комплексных сопротивлений позволяет достичь времени измерения порядка 10 мсек на оба измерения при точности измерения 1—0,5%, но числа  $N_1$  и  $N_2$ , соответствующие временным интервалам  $t_1$  и  $t_2$ , имеют явно нелинейную зависимость от измеряемых параметров и к тому же  $N_2$  является функцией величин как активной, так и реактивной составляющих. Например, при измерении составляющих комплексного сопротивления параллельной  $R_x C_x$  цепи числа  $N_1$  и  $N_2$  имеют вид

$$N_1 = K_1 \cdot \frac{R_x}{R_0 + R_x}$$

и

$$N_2 = K_2 \cdot \frac{R_x}{R_0 + R_x} \cdot C_x,$$

где  $R_0$  — калиброванное сопротивление в измерительной цепи;  $K_1$  и  $K_2$  — постоянные коэффициенты преобразования.

Рассмотрим возможные варианты линеаризации характеристик измерения параметров элементов, образующих реактивную и активную составляющую комплексного сопротивления, на примере параллельной  $R_x C_x$  цепи (под линеаризацией в данном случае понимается получение линейного и раздельного отсчета по обем составляющим в виде чисел  $N_{1л} = K_{1л} R_x$  и  $N_{2л} = K_{2л} C_x$ , где  $K_{1л}$  и  $K_{2л}$  — постоянные коэффициенты преобразования).

Процесс время-импульсного преобразования параметров комплексных сопротивлений  $R_x \rightarrow N_1$  и  $C_x \rightarrow N_2$  состоит из трех промежуточных преобразований:

$$R_x \rightarrow U_x(R_x) \rightarrow t_1(R_x) \rightarrow N_1(R_x)$$

по первой составляющей и

$$C_x \rightarrow U_x(C_x) \rightarrow t_2(C_x) \rightarrow N_2(C_x)$$

— по второй составляющей, т. е. сначала величина исследуемого параметра преобразуется в напряжение  $U_x$ , затем напряжение  $U_x$  преобразуется во временной интервал  $t_1$  (или  $t_2$ ), и временной интервал  $t_1$  (или  $t_2$ ) преобразуется в соответствующее число  $N_1$  (или  $N_2$ ), пропорциональное  $R_x$  или  $C_x$ . Линеаризацию характеристик измерения в принципе возможно осуществить как на одном из промежуточных преобразований, так и на нескольких одновременно, хотя последнее нецелесообразно. При измерении активной составляющей  $R_x$  линеаризация промежуточного преобразования  $R_x \rightarrow U_x$  состоит в получении в установившемся режиме напряжения  $U_x$  вида  $U_{xл} = K_{ли} R_x$ , где  $K_{ли} = \text{const}$ . Это осуществимо при использовании в качестве опорного воздействия линейно изменяющегося напряжения и замене в измерительной цепи калиброванного сопротивления  $R_0$  на калиброванную емкость  $C_0$ . При подаче на измеритель-

ную цепь линейно изменяющегося напряжения  $U_0(t) = K_p t$ , где  $K_p$  — крутизна напряжения  $U_0(t)$ , напряжение  $U_{хл}$  в этом случае изменяется по закону

$$U_{хл} = K_p C_0 \cdot R_x [1 - e^{-\frac{t}{(C_0 + C_x) R_x}}]$$

и в установившемся режиме будет

$$U_{хл} = K_{ли} \cdot R_x,$$

где

$$K_{ли} = K_p C_0.$$

Этот способ линеаризации имеет несомненное достоинство, заключающееся в том, что при последующем преобразовании  $U_x \rightarrow R_x$  отпадает необходимость в использовании специального генератора линейной развертки, поскольку в качестве напряжения развертки возможно использование части  $U_0(t)$ . Однако в связи с заменой  $R_0$  на  $C_0$  увеличивается постоянная времени измерительной цепи, что при сохранении той же точности преобразования  $U_x \rightarrow R_x$ , (как и в [1]) снижает быстродействие всего преобразователя. Более подробный анализ процессов в измерительной цепи показывает также, что для поддержания напряжения  $U_x$  такой же величины, что и в [1], размах пилообразного напряжения  $U_0(t)$  должен быть значительно выше  $E_0$ .

Линеаризация характеристик измерения, осуществляемая в преобразовании  $U_x(R_x) \rightarrow t_1(R_x)$ , свободна от этих недостатков. Сущность линеаризации при этом заключается в использовании нелинейной развертки, для которой напряжение развертки  $U_p$  имеет ту же зависимость от времени, что и напряжение  $U_x$  от  $R_x$ . Действительно, если использовать в качестве развертки напряжение  $U_p$ , изменяющееся по закону  $U_p = E_0 \frac{t}{t_0 + t}$ , где  $t_0$  — постоянная величина, то временной интервал  $t_1$  от момента запуска развертки до момента равенства  $U_p = U_{хуст}$  (где  $U_{хуст}$  для схемы рис. 1 определяется выражением  $U_{хуст} = E_0 \frac{R_x}{R_0 + R_x}$ ) будет зависеть от величины  $R_x$

$$t_1 = \frac{t_0}{R_0} \cdot R_x,$$

т. е.

$$t_{1л} = K_{лт} R_x,$$

где

$$K_{лт} = \frac{t_0}{R_0}.$$

Следует отметить, что при использовании развертки вида  $U_p = E_0 \frac{t}{t_0 + t}$  необходимо использовать задержку запуска развертки относительно момента подачи опорного воздействия (рис. 2). Это объясняется тем, что момент сравнения  $U_p$  и  $U_x$

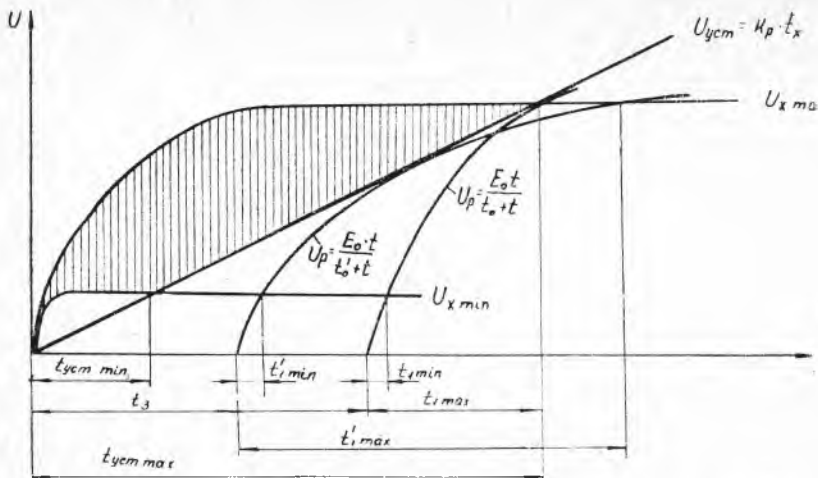


Рис. 2. Временная диаграмма преобразования  $U_x(R_x) \rightarrow t_1(R_x)$

не должен наступать ранее завершения переходного процесса в измерительной цепи для любой точки диапазона измеряемых  $R_x$ , т. е. функция  $U_p(t)$  не должна пересекаться с линией установления вынужденного режима  $U_{уст}(t_x)$ , которая в диапазоне измеряемых  $R_x$  и  $C_x$  определяется выражением

$$U_{уст}(t_x) = K'_p \cdot t_x,$$

где  $K'_p$  — крутизна линии установления вынужденного режима

$$K'_p = \frac{E_0 (\gamma'_{уст} - 1)}{R_0 C_{x \max} \cdot \ln \gamma'_{уст}}.$$

Здесь

$C_{x \max}$  — верхний предел измеряемых  $C_x$ ;

$\gamma'_{уст}$  — допустимая относительная погрешность установления вынужденного режима.

Как видно из рис. 2, наиболее оптимальным является случай, когда функция  $U_p(t)$  касается линии установления вынужденного режима  $U_{уст}(t_x)$  в точке, соответствующей максимальному значению  $t_x$  (или то же самое, что и  $R_x$ ) для данного диапазона измеряемых  $R_x$ . В любом другом случае будет наблюдаться потеря либо в быстродействии (кривая  $U_p(t)$ ), либо в точности измерения. Исходя из этого, можно записать

$$\begin{cases} \frac{dU_p(t)}{dt} = K'_p \\ U_p(t_{1 \max}) = U_{x \max}. \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) преобразуется в систему

$$\begin{cases} \frac{E_0 \cdot t_0}{(t_0 + t_{1\max})} = K'_p \\ \frac{E_0 \cdot t_{1\max}}{t_0 + t_{1\max}} + K'_p (t_{1\max} + t_3), \end{cases}$$

откуда определим параметры развертки  $t_0$  и  $t_3$ :

$$t_3 = \frac{E_0}{2K'_p} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4K'_p t_{1\max}}{E_0}} \right) - t_{1\max}, \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{E_0}{2K'_p} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4K'_p t_{1\max}}{E_0}} \right) - t_{1\max}. \quad (3)$$

Другой особенностью использования функциональной развертки  $U_p(t) = \frac{E_0 \cdot t}{t_0 + t}$  является ухудшение точности преобразования за счет нелинейности функции развертки. Действительно, если напряжение  $U_x$  устанавливается в вынужденном режиме с относительной погрешностью  $\gamma_{уст}$ , то погрешность измерения  $R_x$  определяется формулой

$$\gamma_{R_x} = \gamma_{уст} \frac{R_0 + R_x}{R_0 + R_x \gamma_{уст}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что величина погрешности  $\gamma_{R_x}$  зависит как от величины  $R_0$ , так и от  $R_x$ . Если выразить  $R_0$  как  $R_0 = k_B \cdot R_{XB}$ , а величину измеряемого  $R_x$ , как  $R_x = R_R \cdot R_{XН}$ , где  $k_B$  — коэффициент выбора  $R_0$ ,  $R_{XB}$  и  $R_{XН}$  — верхний и нижний пределы измеряемых  $R_x$ , а  $k_R$  — относительная величина  $R_x$  в диапазоне измерения, то погрешность  $\gamma_{R_x}$  можно представить так:

$$\gamma_{R_x} = \frac{\kappa_R + \kappa_B \cdot 100}{\kappa_B \cdot 100 + \kappa_R \cdot \gamma_{уст}}$$

График  $\gamma_{R_x} = f(k_B)$  при различных  $k_B$  представлен на рис. 3, из которого следует, что значение  $k_B$  следует выбирать  $k_B \geq 1$ . При меньших значениях  $k_B$  погрешность от линеаризации резко возрастает.

Наличие времени задержки запуска развертки приводит к тому, что по сравнению с [1] для  $R_{X\max}$  в диапазоне измеряемых  $R_x$  величина времени измерения остается неизменной и равной  $t_{уст \max}$ , тогда как в области малых значений  $R_x$  в этом же диапазоне время измерения увеличивается, поскольку время задержки  $t_3$  может превышать величину  $t_{уст \min}$  (см. рис. 2). Генератор функциональной развертки наиболее целесообразно выполнить в виде функционального преобразователя код — напряжение, работающего в режиме последовательного счета.

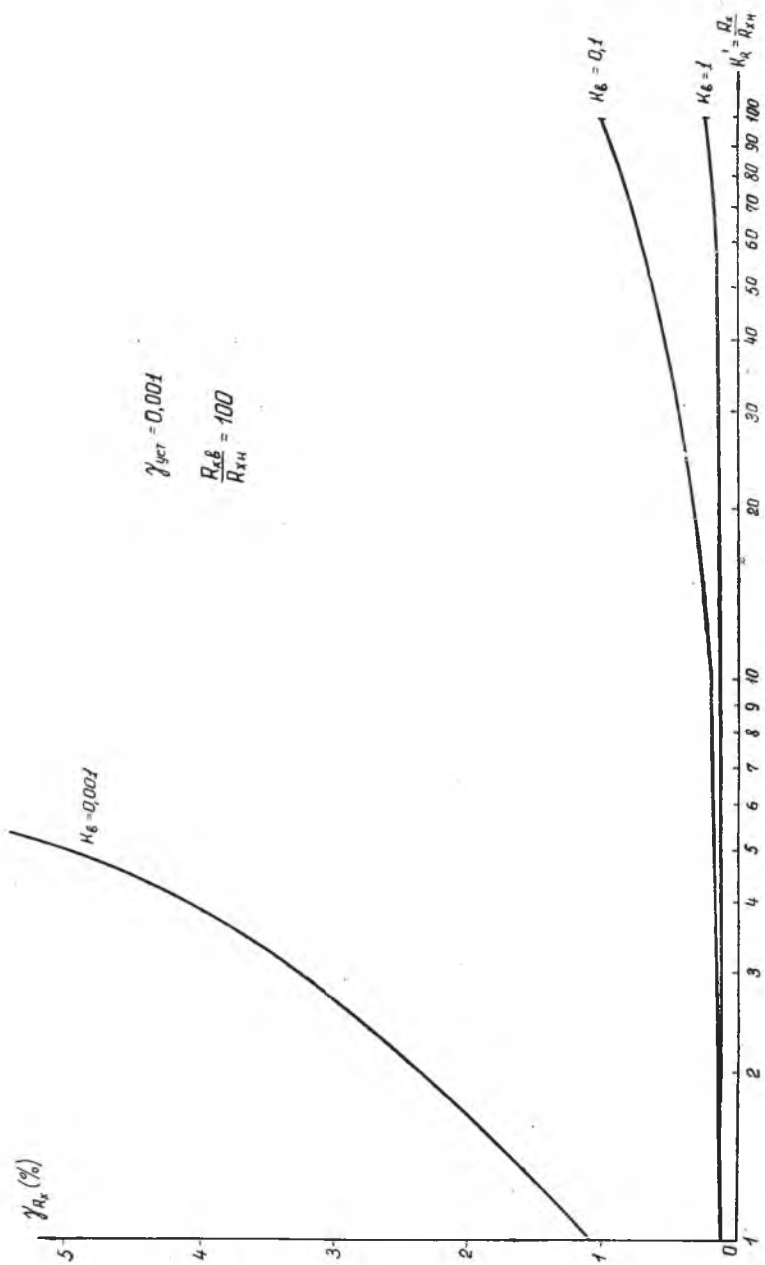


Рис. 3. График зависимости  $\gamma_{R_x} = f(K_R)$ .

Это позволит совместить функции источника напряжения развертки, устройства памяти, необходимого для запоминания напряжения  $U_{\text{уст}}$ , которое используется при измерении второй составляющей комплексного сопротивления и отсчетного устройства в одном функциональном узле.

Линеаризация характеристик в преобразовании  $t_1(R_x) \rightarrow N_1(R_x)$  является наименее перспективной, поскольку для осуществления ее необходимо либо заполнять временной интервал счетными импульсами с периодом повторения  $T_{\text{сч}} =$

$= \frac{\kappa_{\text{сч}}}{R_0 + R_x}$ , где  $\kappa_{\text{сч}} = \text{const}$ , либо использовать арифметическое устройство, осуществляющее вычисление дроби вида  $N_1 R_0 (1 - N)$ . Первое является проблематичным, поскольку информацию о величине  $R_x$  необходимо иметь до получения интервала  $t_1$ . Во втором же случае арифметическое устройство весьма громоздко и, по сравнению с вышеописанными методами, линеаризация, осуществляемая таким образом, нецелесообразна.

Как уже говорилось, вторая составляющая исследуемого комплексного сопротивления измеряется в повторном переходном режиме на основании использования процесса разряда реактивного элемента. Временной интервал, пропорциональный второй составляющей, получают от момента возбуждения переходного процесса до момента равенства напряжений  $U_{\text{хп}} = U_{\text{п}}$ , где  $U_{\text{хп}}$  — напряжение на средней точке измерительной цепи в переходном режиме, определяемое выражением

$$U_{\text{хп}} = U_{\text{уст}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{экв}}}}, \quad (5)$$

а  $U_{\text{п}}$  — пороговое напряжение, равное  $U_{\text{п}} = e^{-1} U_{\text{уст}}$ . Постоянная времени  $\tau_{\text{экв}}$  измерительной цепи при этом зависит от типа измерительной цепи; если разряд осуществляется в замкнутой измерительной цепи, то

$$\tau_{\text{экв}} = R_0 \cdot \frac{R_x}{R_0 + R_x} \cdot C_x,$$

а если в разомкнутой цепи, то

$$\tau_{\text{экв}} = R_x \cdot C_x.$$

Временной интервал  $t_2$ , получаемый таким способом, оказывается равным по величине  $\tau_{\text{экв}}$ .

Следует отметить, что линеаризация характеристик измерения при этом по второй составляющей осуществляется с учетом результата измерения по первой составляющей, так как интервал  $t_2$  зависит как от величины  $R_x$ , так и от  $C_x$ .

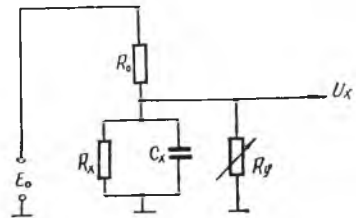


Рис. 4. Измерительная цепь с управляемым элементом  $R_y$

Линеаризация осуществляется, как и при измерении первой составляющей, на каком-либо одном из промежуточных преобразований за исключением преобразования  $C_x \rightarrow U_x(C_x)$ , так как пока не найдены способы осуществления такой линеаризации. Линеаризация характеристик измерения в преобразовании  $U_x \rightarrow t_2(C_x)$  заключается в получении интервала  $t_2$  вида  $t_2 = K_{2n} \cdot C_x$ , где  $K_{2n}$  должен быть постоянным коэффициентом преобразования. Это можно осуществить путем разряда  $C_x$  на некоторое постоянное сопротивление  $R_{\text{экв}}$  [4]. Поскольку  $R_x$  изменяется в диапазоне измерения, необходимо включение в измерительную цепь управляемого сопротивления  $R_y$ , с помощью которого сопротивление разряда  $R_{\text{экв}}$  можно выставить постоянным для любой точки в диапазоне измеряемых  $R_x$ .

Способ включения  $R_y$  определяется видом исследуемого комплексного сопротивления. Если измеряется величина  $C_x$  параллельного соединения  $R_x C_x$ , то управляемое сопротивление подключается параллельно исследуемому, как показано на схеме рис. 4, где управляемое сопротивление представляет собой преобразователь код — проводимость. При выдаче на вход преобразователя код — проводимость дополнительного кода числа  $N_1 = N_{\text{экв}} \cdot K_1 \cdot R_x$ , проводимость его становится равной  $g_p = g_{\text{экв}} - g_x$ . Тогда общая величина сопротивления разряда будет равна  $R_p$

$$\frac{1}{R_p} = g_{\text{экв}} - g_x + g_x = g_{\text{экв}} = \frac{1}{R_{\text{экв}}},$$

$$R_p = R_{\text{const}},$$

а в временной интервал  $t_2$ , получаемый описанным выше способом разряда в этой цепи, равен

$$t_r = \tau'_{\text{экв}} = C_x \cdot R_{\text{const}}.$$

Для линеаризации преобразования  $t_2 \rightarrow N_2(C_x)$  можно использовать либо счетные импульсы с управляемым периодом следования, либо арифметическое устройство. В этом случае операции осуществляются гораздо проще, чем при линеаризации измерения первой составляющей, так как мы уже имеем информацию о величине первой составляющей. Для получения линейного и раздельного отсчета необходимо иметь счетные импульсы с периодом, пропорциональным величине первой составляющей  $T_{\text{сч}} = f(R_x)$ . Способ получения импульсов  $T_{\text{сч}}$  определяется видом цепи разряда  $C_x$ . Для закороченной измерительной цепи

$$T_{\text{сч}} = k \frac{R_x}{R_0 + R_x},$$

а для разомкнутой

$$T_{\text{сч}} = k \cdot R_x.$$



Это обуславливает специфику устройства генерирующего  $T_{сч}$ . Поскольку информация о величине первой составляющей имеется в виде напряжения  $U_{хуст}$ , фиксируемого ФПКН и определяемого выражением (4), и в виде параллельного кода числа  $N_1$ , то в случае закороченной измерительной цепи целесообразно использовать преобразователь напряжение — частота, а в случае разомкнутой — преобразователь код — период.

В первом случае получаем импульсы с частотой

$$f_{сч} = \frac{1}{T_{сч}} = A_1 \cdot \frac{R_0 + R_x}{R_x},$$

а во втором  $f'_{сч} = A_1 \cdot R_x$ . Числа  $N_2$  как в этом, так и в другом случае получаются равными

$$N_{гл} = \tau_{экв} \cdot f_{сч} = k_r \cdot C_x$$

$$N'_{гл} = \tau'_{экв} \cdot f'_{сч} = k_r \cdot C_x.$$

Линеаризация измерения второй составляющей с помощью арифметического устройства заключается в осуществлении операции деления числа  $N_2$  на число  $N_1$ , в результате чего получаем число  $N_{2л} = \kappa_2 \cdot C_x$ . В этом случае линеаризации используется наиболее сложное оборудование, но вместе с тем обеспечивается наивысшая точность измерения  $C_x$ .

Совместное использование различных методов линеаризации позволяет создать измерительные приборы с линейным отсчетом по обеим составляющим [5]. Выбор того или иного способа линеаризации обуславливается требованиями, предъявляемыми к измерительному устройству как по точности, так и по допустимым затратам на оборудование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кирин Ю. П., Рыжевский А. Г. Время-импульсное преобразование параметров комплексных сопротивлений. Сб. «Информационно-измерительная техника», вып. 4, Пенза, 1969.
2. Шляндин В. М., Рыжевский А. Г., Кирин Ю. П. Способ получения параметров комплексной электрической цепи. Авторское свидетельство № 219013, ИПОТЗ, № 18, 1968.
3. Шляндин В. М., Рыжевский А. Г., Кирин Ю. П. Устройство для контроля параметров комплексных электрических цепей. Авторское свидетельство № 243732, ИПОТЗ, № 17, 1969.
4. Шляндин В. М., Рыжевский А. Г., Кирин Ю. П. Цифровой прибор для измерения параметров комплексных сопротивлений. Авторское свидетельство № 245915, ИПОТЗ, № 20, 1969.
5. Шляндин В. М., Рыжевский А. Г., Кирин Ю. П. Об использовании переходных процессов для измерения составляющих комплексных сопротивлений. «Приборы и системы управления», № 3, 1971.