ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXVI, № 6, 1973 Серия технических наук

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

А. П. ШОРЫГИН, Э. В. КАЗАРЯН, Л. Л. ГВАРАМАДЗЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАПИЛЛЯРНЫХ РТУТНО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАТОРНЫХ ТРИОДОВ С РЕЗИСТИВНЫМ НЕРАЗРУШАЮЩИМ СЧИТЫВАНИЕМ

В интеграторных электрохимических триодах с параметрическим электрическим считыванием выходной величиной служит линейное сопротивление, которое монотонно изменяется в зависимости от электрического заряда, протекшего в цепи управления, и сохраняется неизменным в течение длительного времени после прекращения управляющего воздействия. В этих триодах сопротивление увеличивается или уменьшается в результате переноса металла с одного рабочего электрода на другой при протекании тока управления [1—4].

Электрохимические интеграторные элементы с резистивным считыванием отличаются простотой устройства, малым потреблением энергии, малыми габаритами. Они хорошо сочетаются с интегральными схемами. Указанные триоды могут использоваться в устройствах автоматического контроля, в адаптивных системах, в классификаторах, устройствах связи и др.

Рассматриваемые элементы могут работать при очень больших длительностях непрерывных или дискретных сигналов управления. Кроме того, они могут управляться импульсными сигналами с частотами следования до сотен мегагерц. Хранение информации происходит без потребления энергии. Отключение источника питания не приводит к потере информации. Легко осуществляется неразрушающее считывание. Для опроса не требуется дополнительного времени. Поэтому после завершения интегрирования, обучения или настройки, быстродействие элемента во многих случаях ограничивается только временем распространения сигнала в опорных цепях. Считывание возможно как переменным током частотой от сотен герц до мегагерц, так и униполярными импульсами длительностями от десятков миллисекунд до сотен наносекунд [5, 6]. Известны два метода резистивного считывания, представляющие практический интерес, а именно:

1. По электрическому сопротивлению резистивного электрода (твердофазные капальные электрохимические триоды—ТКЭ-триоды или ЭУР);

2. По электрическому сопротивлению междуэлектродного проме-

жутка—«электролитного зазора» (капиллярные ртутноэлектрические триоды— КРЭ-триоды).

Наряду с такими достоинствами как относительно высокое быстродействие, большая кратность изменения выходной величины, известные элементы на основе ТКЭ-триодов обладают существенной нелинейностью, гистерезисом характеристик управления и их разбросом [3]. Поэтому для тех случаев, когда нужны большие времена интегрирования, представляют существенный практический интерес элементы со считыванием по сопротивлению междуэлектродного промежутка, у которых, при соблюдении определенных требований к конструкции и технологии изготовления, можно обеспечить высокую линейность и повторяемость характеристик управления в широком диапазоне выходных величин при практическом отсутствии гистерезиса и дрейфа.

Капиллярный ртутно-электролитический интеграторный триод с резистивным считыванием (рис. 1,*а*) состоит из трех капилляров *1*, *2* и *3* с впаянными с одного конца выводами.

Другие концы капилляров открыты в общую камеру *4*, образующую вместе с капиллярами изолирующую герметическую оболочку, залитую электролитом. Короткий капилляр со ртутью *3* служит электро-

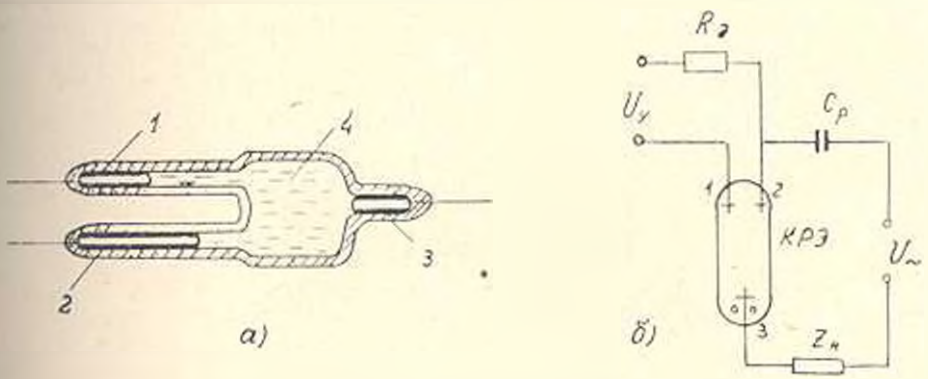

Рис. 1. *а*—Схема устройства капиллярного ртутно-электролитического интеграторного триода с резистивным считыванием; *б*—Схема интеграторного элемента с непосредственным преобразованием (со считыванием заданным напряжением). КРЭ—капиллярный ртутно-электролитический триод; *1* и *2*—электроды управления; *3*—электрод считывания; $R_д$—добавочное сопротивление в цепи управления; $C_р$—разделительный конденсатор; U_y—напряжение управления; $U_\sim$—напряжение считывания.

дом считывания. Другие два капилляра *1*, *2* заполнены ртутью лишь частично, что позволяет осуществлять электролитический перенос ртути с одного рабочего электрода на другой.

У исследованного нами элемента электролитом служил раствор йодистой ртути с добавкой избытка постороннего электролита (йодистого калия). Так как удельное сопротивление применяемого электролита почти на два порядка величины превышает удельное сопротивление ртути, то при электролитическом переносе ртути с одного рабочего электрода на другой соответственное изменение значения выходного

сопротивления между любым из двух рабочих электродов *1*, *2* и электродом считывания *3* происходит практически только за счет изменения длины столбиков электролита.

Сопротивление считывания на переменном токе для простейшей схемы по рис. 1, *б* при достаточно большой для выбранной частоты разделительной емкости (конденсатор $C_р$) приблизительно равно (при малости реактивных сопротивлений триода):

$$Z_{сч} = \frac{Z_{э3}(Z_{12} - Z_{23} + R_н)}{Z_{12} + R_н}, \qquad (1)$$

где Z_{12} — сопротивление триода по цепи управления (между рабочими электродами *1* и *2*); Z_{23} — то же между электродом считывания и одним из рабочих электродов.

В отличие от ТКЭ-триода [5] у рассматриваемого элемента сопротивление электродов везде мало по сравнению с последовательно соединенными с ними столбиками электролита на участках капилляров, свободных от ртути. Кроме того, сопротивление общей камеры также мало, и им можно пренебречь ввиду относительно большого поперечного сечения камеры. В результате эквивалентная электрическая схема для рассматриваемого триода существенно упрощается (рис. 2).

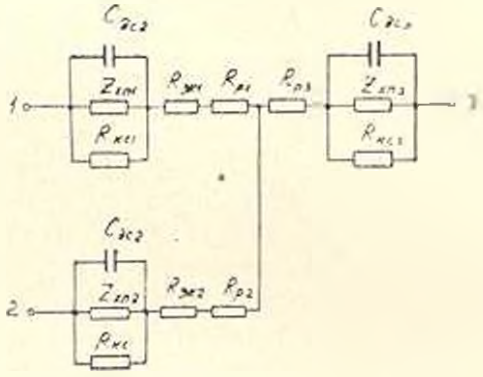

Рис. 2. Эквивалентная схема КРЭ-триода: *1* и *2* — электроды управления; *3* — электрод считывания; Z_{12} — сопротивление нестационарной диффузии (соответствующими индексами помечены параметры элементов схемы).

Тогда, пользуясь [6], для цепи считывания можно написать:

$$Z_{сч} = R_н + \frac{R_{кс}A}{A + R_{кс}\sqrt{j\omega} + R_{кс}AC_н j\omega}, \qquad (2)$$

$$R_н = R_{эк} + 2R_р.$$

где A — концентрационная постоянная; $R_{кс}$ — сопротивление квазистационарной диффузии; $C_{эк}$ — емкость двойного слоя; $R_{эк}$ — сопротивление электролита в капилляре; $R_р$ — сопротивление растекания между устьем капилляра и общей камерой с электролитом.

С некоторым приближением, пользуясь известными формулами для стационарного электрического поля,

$$R_{эк} = \frac{1}{\varkappa_э S_к} \text{ и } R_р = \frac{K_к}{\varkappa_э \sqrt{\pi S_к}}, \qquad (3)$$

где $\varkappa_э$ — электропроводность среды (электролита); $K_к$ — коэффициент растекания, зависящий от конфигурации перехода от капилляра к камере*, ($K_к \geqslant 1$); $S_к$ — поперечное сечение капилляра.

Для типичных параметров КРЭ-триодов членом, обусловленным проводимостью двойного слоя, можно пренебречь, так как в области низких частот

$$R_{кс} \cdot A \cdot C_{эк} \ll A; \; R_{кс},$$

а на высоких частотах можно пренебречь вторым слагаемым [6]. Тогда для цепи считывания КРЭ-триода амплитудные и фазо-частотные характеристики в относительных единицах имеют вид:

$$\frac{Z_{сч}}{R_э} = \sqrt{\left| 1 + 2\gamma_1 \frac{1 - \delta_1 \omega}{(1 + \delta_1 \omega)^2 + (\delta_1 \omega)^2} \right|^2 + \left| 2\gamma_1 \frac{\delta_1 \omega}{(1 + \delta_1 \omega)^2 + (\delta_1 \omega)^2} \right|^2}, \qquad (4)$$

$$\varphi_{сч}(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\gamma_1 \delta_1 \omega}{2\gamma_1 (1 + \delta_1 \omega) + (1 + \delta_1 \omega)^2 + (\delta_1 \omega)^2}, \qquad (5)$$

где $\gamma_1 = R_{кс}/R_э$ и $\delta_1 = R_{кс}/A$.

Параметр γ_1 характеризует ход амплитудно-частотной характеристики в области малых частот, а параметр δ_1 — ее спад в области более высоких частот. Максимальное значение сдвига фаз зависит только от γ_1.

На рис. 3,*а* приведена амплитудно-частотная характеристика испытанного образца для случая, когда рабочий электрод почти полностью заполняет свой капилляр (входное сопротивление близко к наименьшему значению).

Расчетная зависимость максимального сдвига фаз от γ_1 представлена на рис 3,*б*. Так как при практических конструкциях КРЭ-триодов $\gamma_1 < 1/4$, то сдвиг фаз (в отличие от ТКЭ-триодов [8]) не превышает 1

* В простейшем случае, при переходе от цилиндрического проводящего тела малого диаметра к телу большого объема, этот коэффициент приблизительно равен единице.

худшем случае нескольких градусов, так что реактивной составляющей в сопротивлении считывания КРЭ-триода и в сопоставлении его по цепи управления можно пренебречь и, исходя из (4), написать:

$$R_{сч} = R_э + \frac{2R_{кс}(2+\delta\sqrt{\omega})}{(1+\delta\sqrt{\omega})^2+(\delta\sqrt{\omega})^2}. \qquad (6)$$

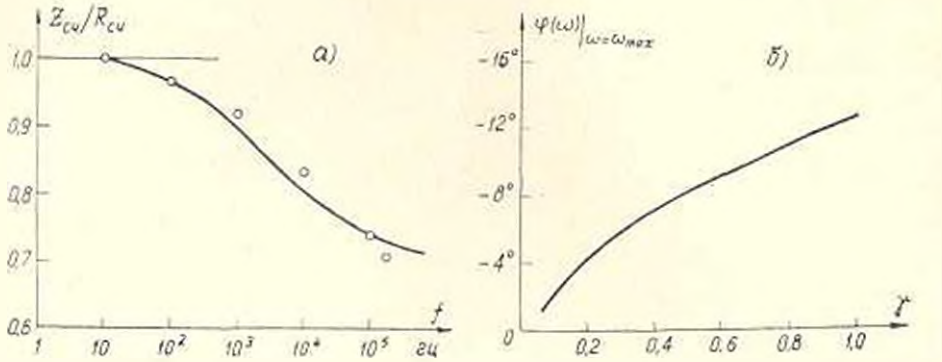

Рис. 3. *а*—Расчетная амплитудно-частотная характеристика считывания интеграторного триода для наименьшей длины столбика электролита в капилляре (точки—экспериментальные значения); *б*—расчетная зависимость сдвига фаз по цепи считывания от параметра γ.

При условии равенства площадей поперечного сечения капилляров $S_к$ в их устьях и постоянства этого сечения по всей длине капилляров l, $2R_к$ является линейной функцией входного заряда, т. е.

$$R_э = \frac{\gamma_i A_н}{zF\gamma_н} \cdot \frac{1}{\varkappa_э S_к^2} \int_0^t I_у(t)dt + \frac{K_к}{\varkappa_э \sqrt{\pi S_к}}, \qquad (7)$$

где γ_i — выход по току [7]; $A_н$ и $\gamma_н$ — атомный вес и плотность ртути, z — валентность ионов, участвующих в электродных реакциях; F — число Фарадея; остальные обозначения ясны из выражения (3).

На рис. 4 приведены характеристики управления образцов КРЭ-триодов, снятые при соблюдении условия $R_э \gg Z_э$ (см. выше). Как видно, зависимости близки к линейным, а гистерезис практически отсутствует. Погрешности, обусловленные поляризацией постоянным током управления, здесь существенно меньше, чем у КРЭ-диодов с оптоэлектронным считыванием [9, 10], так что в большинстве случаев необходимость в дополнительных компенсационных контурах здесь отпадает.

Диапазон изменения выходных сопротивлений КРЭ-триодов существенно шире, чем у ТКЭ-триодов. Остаточное сопротивление считывания, обусловленное, главным образом, сопротивлением растекания, у упомянутых образцов составляет несколько десятков *ом*, а максимальная кратность изменения сопротивления по цепи считывания может изменяться в широких пределах в зависимости от выбранной длины рабочих капилляров (у упомянутых образцов она составляет от 1 : 50 до 1 : 100).

Измерения, проведенные в диапазоне длительностей импульсов от нескольких миллисекунд до долей микросекунды, показали возможность длительного неразрушающего считывания униполярными импульсами без искажения формы импульса.

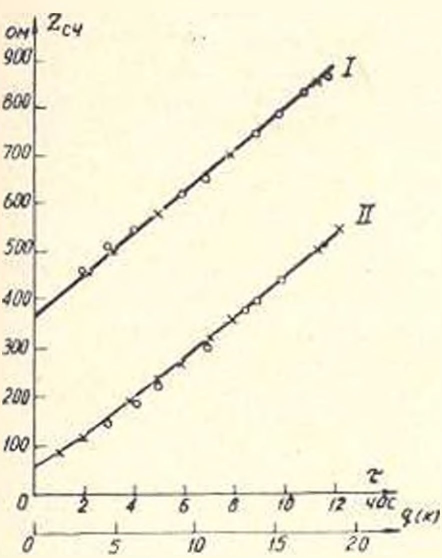

Рис. 4. Экспериментальная зависимость сопротивления считывания от времени (и входного заряда) для двух образцов КРЭ-триодов. (Кривые сняты при постоянном токе управления $I_у$ =0,4 *ма* в комнатных условиях, без термостабилизации. Кружками помечены точки, снятые при прямом ходе, крестиками—при обратном).

Температурный коэффициент выходного сопротивления этих триодов в 2—2,5 раза меньше, чем у эквивалентных по назначению концентрационных интеграторов, причем, в отличие от последних, на КРЭ-триодах могут быть реализованы простые схемы включения с очень малой температурной погрешностью.

Поступило 22.V.1972.

Ա. Փ. ՇՈՐԻՆ, Է. Վ. ԿԱՋԱՐՅԱՆ, Հ. Լ. ԳՎԱՐԱՄԱՁԵ

ՌԵԶԻՍՏԻՎ ՉՔԱՅՔԱՅՎՈՂ ՀԱՇՎՈՒՄՈՎ ՄԱԶԱԿԱՆ ՍՆԴԻԿԱ-ԷԼԵԿՏՐՈԼԻՏԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐՈՂ ՏՐԻՈԴՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում ցույց է տրված, որ մազական սնդիկա-էլեկտրոլիտային տրիոդների որոշակի կոնստրուկցիայի և պատրաստման տեխնոլոգիայի դեպքում կարելի է հասնել նրան, որ ելքի դիմադրության կախումը ժամանակից և մուտքի լիցքից լինի գծային։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шорыгин А. П.* Электрохимические элементы; классификация, общие особенности. Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации, вып. 8, 1967.
2. *Луковцев П. Д.* Электрохимические преобразователи информации. «Журнал ВХО им. Менделеева», *16*, вып. 8, 1971.
3. *Шорыгин А. П.* Сравнительные свойства и основные характеристики электрохимических преобразователей. IV конгресс ИФАК, Варшава, ПНР, изд. ПАН, 1969.
4. *Казарян Э. В., Шорыгин А. П.* Сравнительные свойства электрохимических счетчиков времени наработки. «Известия АН Арм. ССР (серия техн. наук)», т. XXI, № 4, 1968.
5. *Шорыгин А. П.* Исследование входных, выходных и передаточных характеристик твердофазных канальных электрохимических триодов. «Электрохимия», *8*, вып. 12, 1968.
6. *Шорыгин А. П., Балашев А. И.* Характеристики твердофазных канальных электрохимических триодов при импульсном управлении и импульсном неразрушающем считывании. «Приборы и системы управления», № 12, 1969.
7. *Боровков В. С., Графов Б. Н., Добрынин Е. Н., Луковцев П. Д., Новицкий М. А., Новиков Л. А., Соколов Л. А., Цикалов В. А.* Электрохимические преобразователи первичной информации. Изд. «Машиностроение», М., 1969.
8. *Шорыгин А. П.* О фазовых частотных характеристиках электрохимических ячеек с реактивным электродом. «Электрохимия», 7, вып. 3, 1971.
9. *Казарян Э. В., Шорыгин А. П.* Исследование концентрационной погрешности капиллярных ртутно-электролитических преобразователей с фотоэлектрическим считыванием. «Известия АН Арм. ССР (серия техн. наук)», т. XXIV, № 3, 1971.
10. *Шорыгин А. П., Казарян Э. В., Гварамадзе Л. Л.* О связи электрических процессов и оптических эффектов в ртутно-капиллярных ячейках. «Электрохимия», 7, вып. 3, 1971.