

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Շ. Լ. ДАНИЕЛЯՆ, А. П. ШОРЫГИՆ

ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ
РТУТНО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЕМКОСТНЫМ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

Капиллярные ртутно-электролитические элементы (КРЭ-элементы) с емкостным считыванием отличаются высокой стабильностью хранения записанной информации, простотой электрического управления, очень малым временем обращения при считывании, а также малыми габаритами, позволяющими осуществлять их монтаж на печатных платах. В зависимости от способа включения такие приборы могут использоваться как интеграторные, аналоговые запоминающие и адаптивные элементы или счетчики времени наработки [1].

Изменением структур и параметров цепей считывания можно добиться высокой кратности и малой температурной зависимости, используя методы, аналогичные разработанным для схем с резистивным считыванием [2, 3].

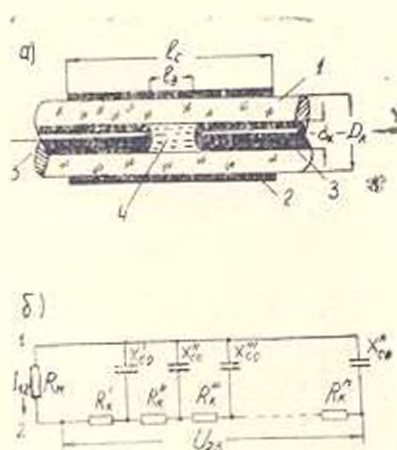


Рис. 1. Схема устройства емкостного преобразователя считывания (а) (1 — капилляр; 2 — наружная обкладка; 3 — ртутные рабочие электроды; 4 — раствор электролита; D_n , D_b — наружный и внутренний диаметры капилляра; l_c — длина наружной обкладки; l — средняя длина межэлектродного промежутка) аппроксимирующая сетка емкостного преобразователя (б) (X_k , ..., X_k — реактивные емкостные сопротивления для отрезков обкладка — капилляр; R_k , ..., R_k — активные сопротивления отрезков заполнения капилляра).

В простейшем случае емкостный преобразователь считывания (рис. 1, а) образован цилиндрической металлической обкладкой, нанесенной на наружную поверхность тонкостенного стеклянного микрокапилляра ртутно-электролитического диода, ртутными столбиками рабочих электродов внутри капилляра и столбиком раствора электролита, заполняющего межэлектродный промежуток. Напряжение считывания подается на рабочие электроды элемента через разделительный конденсатор, а выходное напряжение («напряжение чтения») снимается с наружной обкладки и с одного из этих электродов [1]. Емкости разделительных конденсаторов выбираются достаточно большими, так что их влияние на распределение напряжения в схеме считывания можно не учитывать. Так как электрическая емкость преобразователя по необходимости очень мала (удельная емкость на единицу длины капилляра C_{01} у реальных конструкций составляет по порядку величины около 1 нФ/мм), то считывание может практически осуществляться на частотах приблизительно от сотни кГц и выше до десятков мГц. При таких условиях основное значение при считывании (из числа параметров электрохимической системы) имеет, в первую очередь, активное сопротивление столбиков электролита и ртути в капиллярном канале; влиянием импеданса Варбурга и реактивного сопротивления двойного электрического слоя на границах фаз ртуть—электролит во многих случаях можно пренебречь [4]. Для промежутка между наружной обкладкой и электропроводным заполнением капилляра существенно лишь емкостное реактивное сопротивление, обусловленное поперечными геометрическими размерами капилляра, длиной обкладки и диэлектрической проницаемостью стекла.

Значительное влияние на характеристики управления могут оказывать паразитные емкости между наружной обкладкой преобразователя и, в первую очередь, свободными концами электропроводного заполнения капилляра и выводами, причем влияние этих емкостей должно существенно зависеть от геометрии ячейки и расположения межэлектродного промежутка относительно краев обкладки.

Уже рассмотрение упрощенных эквивалентных систем с сосредоточенными постоянными при двух различных положениях межэлектродного промежутка за пределами обкладки емкостного преобразователя—со стороны общего электрода 1 (рис. 2, а и б) и со стороны второго электрода 2 (рис. 2, а и г)—позволяет судить об основных особенностях схемы. Нагрузка генератора считывания определяется здесь, главным образом, сопротивлением межэлектродного промежутка, так как $R_i \ll X_{c1}, X_{c2}$. Выходное сопротивление преобразователя велико, и схема считывания критична к сопротивлению нагрузки, подключаемой к выходу. Крайность изменения выходного сигнала («напряжения чтения») U_{01} зависит, в первую очередь, от соотношения между емкостью преобразователя и паразитной емкостью (если последняя велика),

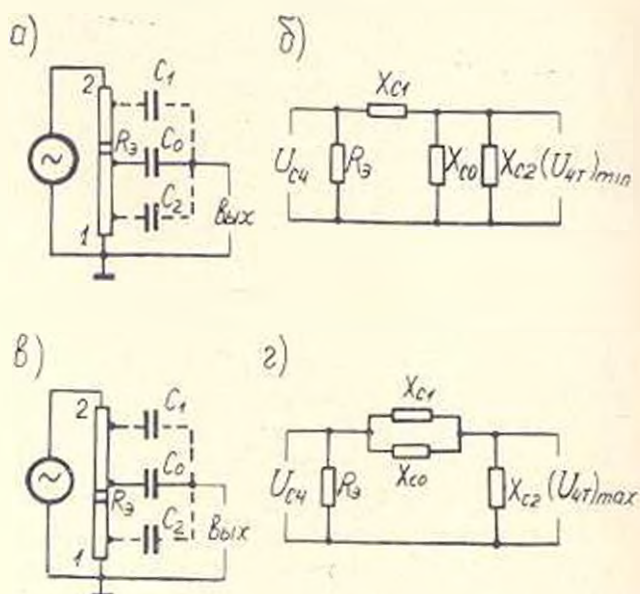


Рис. 2. Упрощенная схема цепи считывания: межэлектродный промежуток расположен со стороны электрода 2 (а); эквивалентная схема (б); то же, но при расположении межэлектродного промежутка со стороны общего электрода 1 (в, г). (C_0 — емкость преобразователя; C_1, C_2 — паразитные емкости; X_{c1}, X_{c0}, X_{c2} — соответствующие емкостные реактивные сопротивления; R_3 — сопротивление межэлектродного промежутка; $U_{сч}$ — напряжение считывания; $U_{ч1}$ — напряжение чтения).

$$k_{\text{кн}} \approx \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) : 1. \quad (1)$$

Когда длина обкладки преобразователя мала по сравнению с длиной капилляра, то, как видно из экспериментальных характеристик, $k_{\text{кн}}$ приближается к 2 : 1, т. е. паразитные и полезные емкости оказываются величинами одного порядка. Увеличение длины обкладки до полной длины капилляра, а также экранирование свободных частей капилляра и выводов электродов 1, 2 при соединении экранов с общим электродом 1 должны существенно ослабить указанное ограничение. В этом случае предел увеличения $k_{\text{кн}}$ обуславливается другими факторами.

При расчете характеристики управления для упрощения задачи будем считать, что элемент снабжен такими экранами, а емкости относительно экранов малы, чтобы при перемещении межэлектродного промежутка вдоль капилляра (в области обкладки преобразователя) считаться только с изменением соотношений активных сопротивлений, обусловленных сопротивлением столбиков ртути и электролита.

Емкостный преобразователь КРЭ-элемента можно рассматривать как коаксиальную систему с распределенными по ее длине параметрами, составленную из отрезков одинаковых поперечных размеров, по

различной длины, и с различным сопротивлением единицы длины заполнения канала капилляра. Аппроксимирующая сетка такой системы показана на рис. 1,б.

Для однородной ячейки с постоянными параметрами можно написать следующее выражение для напряжения на выходе 1—2 при подаче напряжения считывания через вход управления 2—3:

$$U_{12} = \frac{U_{23} R_n}{2} \cdot \frac{1}{R_n + \frac{Z_w}{2} \frac{\operatorname{sh} \gamma l_k}{\operatorname{ch} \gamma l_k - 1}}, \quad (2)$$

где l_k — длина рассматриваемого однородного отрезка; γ — коэффициент распространения; Z_w — волновое сопротивление. При принятых выше допущениях

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_{к1}}{X_{с01}}} \quad \text{и} \quad Z_w = \sqrt{R_{к1} X_{с01}}, \quad (3)$$

где $R_{к1}$ — активное сопротивление вещества, заполняющего капилляр на единицу его длины; $X_{с01} = \frac{1}{j\omega C_{01}}$ — реактивное сопротивление

участка обкладка — заполнение капилляра на единицу его длины; $C_{01} = 2\pi\epsilon_0\epsilon/\ln(D_k/d_k)$ — емкость на единицу длины (здесь D_k , d_k — наружный и внутренний диаметры капилляра, ϵ — диэлектрическая проницаемость материала его стенок).

При достаточно большом $X_{с01}$ по сравнению с $R_{к1}$ (что соответствует практическим конструкциям КРЭ-диодов с емкостным считыванием) можно воспользоваться коэффициентами Кеннели для эквивалентного четырехполюсника. Кроме того, если принять, что сопротивление нагрузки R_n мало по сравнению с $X_{с01}$, то выражение (2) существенно упрощается и можно написать:

$$U_{12} = \frac{\dot{U}_{23} l_k}{2X_{с01}} R_n \quad (4)$$

Пусть, как это выполнено в известных конструкциях, длина обкладки емкостного преобразователя приблизительно равна активной длине капилляра КРЭ-диода ($l_c \approx l_k$). При перемещении границы фаз ртуть—электролит под влиянием управляющего тока за начало отсчета примем свободный конец общего электрода, соединенный с выводом 1 (рис. 2, а и в). Расстояние до указанной границы (длину электрода 1) обозначим через x , причем пренебрежем кривизной граничной поверхности и красными эффектами. При этих условиях ячейка может быть подразделена на три однородных отрезка: длиной l_k , заполненного раствором электролита, длиной x и ($l_c - l_k - x$), заполненных ртутью. При сделанных допущениях, падения напряжения на этих трех участках, в сумме равные U_{12} , запишутся так:

$$\Delta U_1 = U_{\text{сч}} \frac{\frac{x}{l_c}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)}; \quad (5)$$

$$\Delta U_2 = U_{\text{сч}} \frac{\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} \cdot \frac{l_s}{l_c}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)}; \quad (6)$$

$$\Delta U_3 = U_{\text{сч}} \frac{1 - \frac{l_s}{l_c} - \frac{x}{l_c}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где $R_{\text{эл}}$ и $R_{\text{пл}}$ — сопротивление единицы длины капилляра, заполненного соответственно ртутью и раствором электролита.

Воспользовавшись (4), получим токи для каждого из этих участков, образующие вместе ток чтения КРЭ-элемента $I_{\text{чт}}$:

$$I_1 = \frac{U_{\text{сч}} l_c}{X_{\text{сч}}} \frac{\frac{1}{2} \frac{x^2}{l_c^2}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)}, \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{U_{\text{сч}} l_c}{X_{\text{сч}}} \frac{\frac{1}{2} \frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} \cdot \frac{l_s^2}{l_c^2} + \frac{x l_s}{l_c^2}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)}, \quad (9)$$

$$I_3 = \frac{U_{\text{сч}} l_c}{X_{\text{сч}}} \left[1 - \frac{\frac{1}{2} + \frac{l_s^2}{l_c^2} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right) + \frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} \cdot \frac{x l_s}{l_c^2} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l_c^2}}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)} \right], \quad (10)$$

Отсюда, характеристика емкостного преобразователя КРЭ-элемента при нагрузке на сопротивление $R_{\text{н}}$ (существенно меньшее, чем $X_{\text{сч}}$) будет:

$$U_{\text{чт}} = \frac{U_{\text{сч}} l_c}{X_{\text{сч}}} \cdot \frac{\frac{1}{2} + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right) \left(1 - \frac{l_s}{2 l_c} - \frac{x}{l_c} \right)}{1 + \frac{l_s}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{пл}}} - 1 \right)} R_{\text{н}}. \quad (11)$$

Таким образом, при рассматриваемой конструкции КРЭ-диода и выбранных размерах обкладки емкостного преобразователя напряжение чтения (выходное напряжение схемы считывания) является линей-

функцией перемещения границы фаз ртуть—электролит х... При калиброванном капилляре и соответствующем выборе диапазона значений тока управления это перемещение пропорционально электрическому заряду, протекающему в цепи управления [1], а следовательно, линейна и характеристика управления (адаптации), что подтверждается экспериментально.

Чувствительность по напряжению к перемещению:

$$S_x = \frac{\partial l_{\text{св}}}{\partial \left(\frac{x}{l_c} \right)} = - \frac{U_{\text{св}} l_c}{x_{\text{св}}} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{1 + \frac{l_2}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{рт}}} - 1 \right)} \quad (12)$$

Кратность изменения выходного сигнала (напряжения чтения):

$$k_{\text{кн}} = \frac{1 + 2 \frac{l_2}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{рт}}} - 1 \right) \left(1 - \frac{l_2}{2l_c} \right)}{1 + 2 \frac{l_2}{l_c} \left(\frac{R_{\text{эл}}}{R_{\text{рт}}} - 1 \right) \frac{l_2}{2l_c}} : 1 \quad (13)$$

Полученные уравнения с учетом приведенных выше зависимостей дают связь характеристики управления, чувствительности и кратности с основными электрическими и геометрическими параметрами как самого КРЭ-диода, так и его емкостного преобразователя.

Практически $R_{\text{н}}/R_{\text{рт}}$ задается при выборе электрохимической системы, а величиной, которую проще всего варьировать при изготовлении КРЭ-диода, является межэлектродный промежуток. Анализ уравнения (13) показывает, что зависимость кратности от относительной длины межэлектродного промежутка имеет максимум, на-

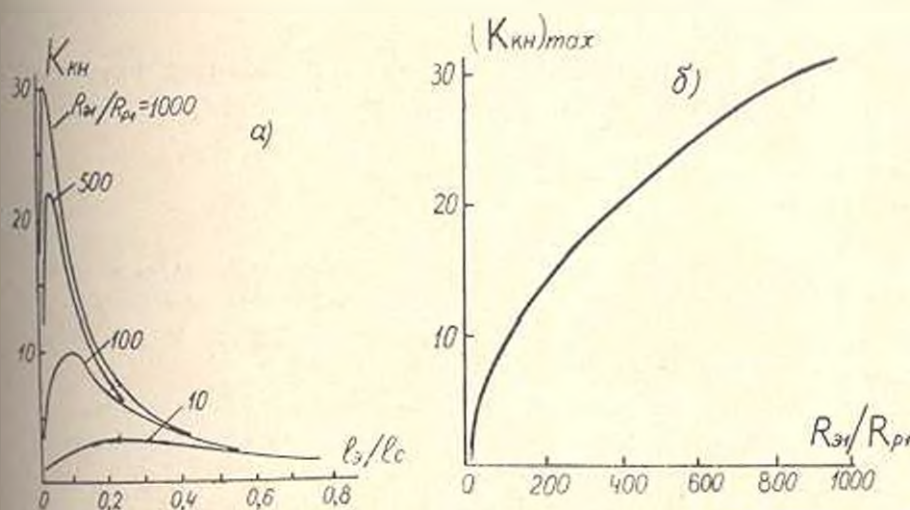


Рис. 3. Зависимость кратности от относительной длины межэлектродного промежутка (а); зависимость максимальной кратности от отношения увеличенного сопротивления электролита и ртути (б).

ходящийся в области физически возможных значений I_b/I_c , причем с ростом $R_{\text{д}}/R_{\text{р}}$ этот максимум смещается в сторону меньших I_b/I_c (рис. 3, а)

При значениях $R_{\text{д}}/R_{\text{р}}$, характерных для серийно выпускаемых КРЭ-диодов, в практически используемых частотах считывания этот оптимум находится около

$$I_b \approx I_c \left(\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{р}}} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

а максимальные теоретические кратности при этом не превышают пяти-шести-тридцати. На рис. 3, б показана зависимость максимальной кратности от отношения удельных сопротивлений электролита и ртути. Дальнейшее увеличение $k_{\text{сн}}$ возможно, главным образом, путем выбора соответствующих структур схем включения [3], в частности, с использованием фазового детектирования.

Зависимость чувствительности от относительной длины межэлектродного промежутка не имеет экстремума, наибольшая чувствительность достигается при наибольшем практически возможном значении $(I_b/I_c) < 1$. Однако при имеющихся место значениях $R_{\text{д}}/R_{\text{р}}$ чувствительность незначительно зависит от I_b/I_c , и выбор последнего определяется только условием достижения наибольшей кратности при заданном $R_{\text{д}}/R_{\text{р}}$.

Институт проблем управления АН СССР

Получено 13.XI.1974

Т. М. ДАНИЕЛЯН, А. П. ШОРИГИНА

ՈՒՎԱԼԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՀԱՇՎՈՒՄՈՎ ՄԱԶԱՆՈՒԱՅԻՆ ՍՆԿԻԱ—
— ԷԼԵԿՏՐՈԼԻՏԱՅԻՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Պատկալային հաշվումով ինտեգրատորային, անալոգային հիշող և ազապ-տացիոն էլեմենտներն ուղղված են զրկա-էլեկտրոլիտային էլեմենտների ալլ տիպերի համեմատությամբ կառուցվածքով ավելի պարզ են և հեշտությամբ են հնթարկվում միկրոմինիատյուրիզացիային

Հոգվածում, անսկային կերպափոխիչով էլեմենտում անդի ունեցող պրո-ցեսների վերլուծության հիման վրա, առաջարկվում է սխեման մաթեմա-տիկական մոդելը՝ պատկերացնելով այդ էլեմենտը որպես բաշխված պարա-ձևարներով սխեման: Ստացված հավասարումները ապին են կառավարման բնութագրերի, զգալունակության ու բաղմապատիկության կախումը էլեմենտի

երկրաչափական ու էլեկտրական հիմնական պարամետրերից և հնարավորություն ևն րնձեռնում գտնել նրանց օպտիմալ արժեքները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шорыгин А. П., «Приборы и системы управления», 1973, № 9.
2. Шорыгин А. П., Гварамадзе А. А. Авторское свидетельство № 392559, «Бюллетень изобретений», 1973, № 32
3. Шорыгин А. П., Казарян Э. В., Гварамадзе А. А. «Известия АН АрмССР, серия технических наук», т. XXVI, № 6, 1973.
4. Гварамадзе А. А., Шорыгин А. П. «Приборы и системы управления», 1973, № 6