

УДК 621.317.33

А. В. Грачев

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

A. V. Grachev

ERRORS ANALYSIS OF THE CONVERTER CAPACITY MEASURING CIRCUIT WITH CONTACTLESS CONDUCTIVITY SENSOR

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Кондуктометрические датчики широко используются в устройствах измерения электропроводности и состава жидких сред, влажности сыпучих и твердых материалов. Бесконтактные кондуктометрические датчики (БКД) обеспечивают ряд преимуществ перед более распространенными контактными кондуктометрическими датчиками. БКД, например, позволяют осуществить измерение в широком диапазоне температур состава, находящихся в ампулах агрессивных и токсичных жидких сред. Сложность построения и анализа метрологических характеристик таких устройств состоит в том, что БКД представляется четырехэлементной эквивалентной электрической схемой замещения. При этом значительная доля погрешности измерения вносится на этапе преобразования пассивных параметров в активные величины, что делает актуальным анализ погрешностей активной измерительной схемы. *Материалы и методы.* Анализ погрешностей проведен для четырехэлементной схемы замещения БКД с учетом реальных параметров используемого в активной измерительной схеме дифференциального операционного усилителя методом теории направленных графов. *Результаты.* Составлены операторные уравнения выходного напряжения активной измерительной схемы, несущих информацию о всех параметрах БКД. Переход от операторной формы уравнений во временную и анализ погрешностей осуществлен с использованием символьного преобразования в программном продукте Maple. Представлены графики рассчитанных погрешностей. *Выводы.* Проведенный анализ погрешностей позволил определить требования и выбрать тип операционного усилителя. По значениям погрешности инвариантности были определены диапазоны допустимых измерений значений неинформативных параметров БКД.

A b s t r a c t. *Background.* Conductivity sensors are widely used in devices of measurement of conductivity and structure of liquid environments, humidity of loose and solid materials. The Contactless Conductivity Sensors (CCS) provide a number of advantages in front of more widespread contact conductivity sensors. CCS, for example, allow to carry out measurement in the wide range of temperatures of structure which are in ampoules of hostile and toxic liquid environment. Complexity of construction and the analysis of metrological characteristics of such devices consists that CCS is represented a four-element equivalent electric circuit of replacement. At the same time the considerable share of an error of measurement is introduced at a stage of transformation of passive parameters to active sizes that does actual the analysis of the active measuring system errors. *Materials and methods.* The analysis of errors is carried out for CCS four-element equivalent circuit based on actual parameters used in the active measuring scheme of the differential operational amplifier by the theory of directed graphs. *Results.* Compiled active measuring circuits carry information about all the parameters of the output voltage CCS operator equations. The transition from the operator equations in the form of

temporary and error analysis was done using the symbol mapping in the software Maple product. Is a graph of calculated errors. Schedules of the calculated errors are submitted. *Conclusions.* The carried-out analysis of errors has allowed to define requirements and to choose the OA type. From the values of error invariance were defined ranges for the measurement of values of non-informative parameters CCS.

Ключевые слова: бесконтактный кондуктометрический датчик, активная измерительная схема, анализ погрешности.

Key words: contactless conductivity sensor, active measuring scheme, analysis of errors.

Введение

Устройства измерения удельной электропроводности жидких сред применяются в качестве источника информации для контроля физико-химического состава различных жидкостей в системах управления технологическими процессами, в микроэлектронике, при контроле удельной электропроводности деионизованной воды [1] и т.д.

Чаще всего контроль удельной электропроводности жидкостей, используемых в различных производствах, производится с помощью контактных кондуктометров, которые обладают следующими недостатками [2]:

- невысокая точность измерения, вызванная загрязнением электродов в процессе эксплуатации измерителя;
- низкая надежность, обусловленная наличием гальванического контакта «жидкая среда – электрод»;
- невозможность измерения удельной электропроводности агрессивных сред из-за химических реакций, протекающих на поверхности электродов;
- необходимость и сложность регулярной отмывки и зачистки электродов.

Кардинально решить все вышеперечисленные проблемы возможно лишь с помощью применения бесконтактных кондуктометров, которые, несмотря на меньшую чувствительность по сравнению с контактными измерителями, превосходят их в точности и эксплуатационной надежности [3].

Кроме того, бесконтактные кондуктометры обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными контактными датчиками:

- возможность бесконтактного контроля электропроводности агрессивных и токсичных жидких сред;
- полное исключение загрязнения датчика контролируемой жидкостью и исключение необходимости изготовления электродов из драгоценных металлов;
- исключение воздействия контролируемых сред на детали измерителя и, следовательно, изменения его характеристик;
- возможность работы измерителя в широком диапазоне электропроводности, температур и давлений жидкости, в том числе исследования процессов, происходящих в системе, находящейся в запаянной ампуле при высокой и низкой температуре.

Несмотря на очевидные преимущества бесконтактных кондуктометров, до настоящего времени их применение не получило широкого распространения, методик оптимального проектирования таких измерителей значительно меньше, чем для контактных.

Все вышеперечисленные причины ставят проблему оценки погрешности активных измерительных схем бесконтактных кондуктометров в ряд актуальных и своевременных.

Определение относительной погрешности выходного напряжения измерительной схемы бесконтактного кондуктометрического датчика

Схема замещения бесконтактного кондуктометрического датчика (БКД) [4] приведена на рис. 1, где C_1 – емкость, обусловленная диэлектрическими свойствами изоляции электродов; R_1 – активное электрическое сопротивление раствора или вещества, находящегося между электродами датчика; C_2 – емкость, обусловленная полярными свойствами этого раствора или вещества; C_3 – «геометрическая» емкость между электродами незаполненного датчика, определяемая конструкцией, размерами датчика и дополнительной емкостью соединительного кабеля в режиме телеизмерений.

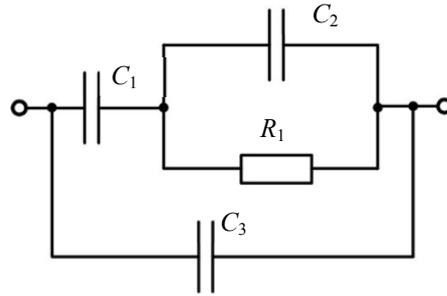


Рис. 1. Схема замещения бесконтактного кондуктометрического датчика

Проводимость такого датчика в операторной форме будет иметь вид

$$Y_{\text{кд}} = pC_3 + \frac{pC_1(pC_2 + G_1)}{pC_1 + pC_2 + G_1}. \quad (1)$$

В работе [5] проведен анализ погрешностей измерения контактного датчика с использованием теории направленных графов [6]. Воспользуемся этой методикой для анализа погрешностей измерительной схемы с бесконтактным кондуктометрическим датчиком [7–9].

На рис. 2 приведены конфигурация измерительной схемы и ее сигнальный граф.

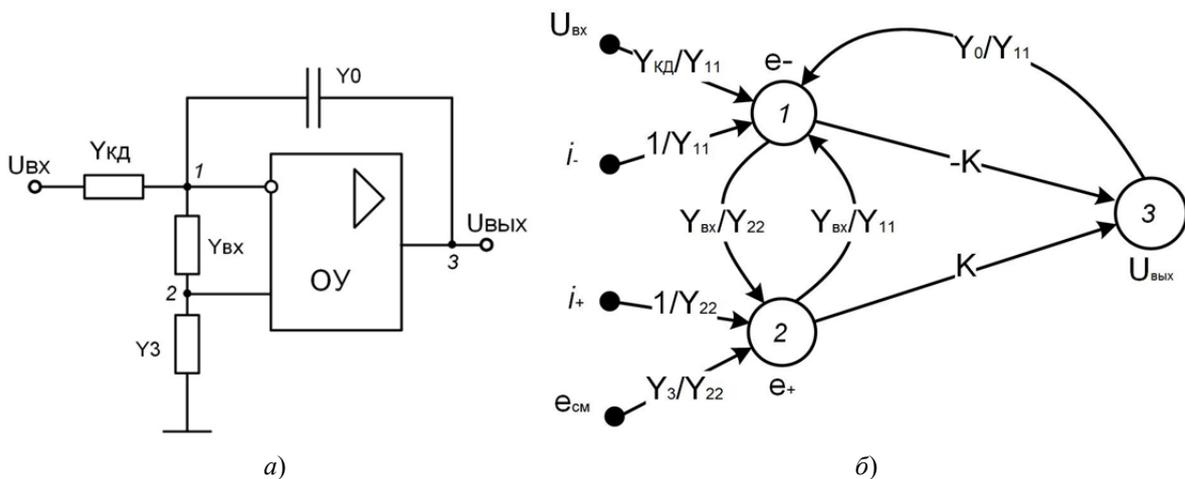


Рис. 2. Измерительная схема БКД:
а – конфигурация; б – сигнальный граф

Данный сигнальный граф составлен в соответствии с [10–12] и описывается системой линейных уравнений (рис. 2). Граф содержит 4 источника, 1 сток, 3 контура. В измерительной схеме (ИС) инвертирующего типа в эквивалентной схеме операционного усилителя (ОУ) можно не учитывать влияние синфазных составляющих: синфазная проводимость $Y_{\text{сф}}$ значительно меньше входной проводимости ОУ $Y_{\text{вх}}$, а коэффициент подавления синфазной составляющей очень велик $M_{\text{сф}} \rightarrow \infty$:

$$\begin{cases} e_+ = e_- \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_{22}} + e_{\text{см}} \frac{Y_3}{Y_{22}} + \frac{i_+}{Y_{22}}, \\ e_- = U_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}}}{Y_{11}} + e_+ \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_{11}} + U_{\text{вых}} \frac{Y_2}{Y_{11}} + \frac{i_-}{Y_{11}}, \\ U_{\text{вых}} = -Ke_- + Ke_+, \end{cases} \quad (2)$$

где e_- и e_+ – напряжения соответственно на инвертирующем и неинвертирующем входах ОУ; $Y_{11} = Y_{\text{кд}} + Y_0 + Y_{\text{вх}}$ и $Y_{22} = Y_3 + Y_{\text{вх}}$ – собственные проводимости узлов 1 и 2; $Y_0 = pC_0$ –

проводимость опорного элемента в цепи обратной связи ОУ. Реальный ОУ не обладает бесконечно большим коэффициентом усиления $K \neq \infty$ и бесконечно большим входным сопротивлением $R_{\text{вх}} \neq \infty$ или нулевой входной проводимостью $Y_{\text{вх}} \neq 0$. Соответственно не равны нулю напряжение смещения $e_{\text{см}} \neq 0$ и входные токи $i_+ \neq 0$ и $i_- \neq 0$. Неинвертирующий вход ОУ соединен с общей шиной через проводимость $Y_3 = G_3 \neq 0$. Для упрощения расчетов в этой схеме положим равными нулю выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 0$, входную емкость $C_{\text{вх}} = 0$ и емкость нагрузки $C_{\text{н}} = 0$ ОУ (при сравнении с типовыми значениями других элементов).

Запишем в операторной форме выходной сигнал ИС, используя формулу Мейсона [12]:

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i \Delta_i}{\Delta} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3 + P_4 \Delta_4 + P_5 \Delta_5 + P_6 \Delta_6 + P_7 \Delta_7 + P_8 \Delta_8}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (3)$$

где P_i – коэффициент передачи i -го пути от истока к стоку; Δ_i – алгебраическое дополнение i -го пути; Δ – определитель Мейсона; L_i – коэффициент передачи i -го контура;

$$\begin{aligned} P_1 &= -KU_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}}}{Y_{11}}; P_2 = KU_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}} Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}; P_3 = -K \frac{i_-}{Y_{11}}; P_4 = K \frac{i_- Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}; \\ P_5 &= K \frac{i_+}{Y_{22}}; P_6 = -K \frac{i_+ Y_{\text{вх}}}{Y_{22} Y_{11}}; P_7 = Ke_{\text{см}} \frac{Y_3}{Y_{22}}; P_8 = -Ke_{\text{см}} \frac{Y_3 Y_{\text{вх}}}{Y_{22} Y_{11}}; \\ \Delta_1 &= \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta_5 = \Delta_6 = \Delta_7 = \Delta_8 = 1; \\ L_1 &= \frac{Y_{\text{вх}}^2}{Y_{11} Y_{22}}; L_2 = -K \frac{Y_0}{Y_{11}}; L_3 = K \frac{Y_0 Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}. \end{aligned} \quad (4)$$

После подстановки (4) в (3) и с учетом того, что $Y_{22} = Y_3 + Y_{\text{вх}}$ и $Y_{11} = Y_{\text{кд}} + Y_0 + Y_{\text{вх}}$, напряжение на выходе будет иметь вид

$$U_{\text{выхреал}}(p) = \frac{K(-U_{\text{вх}} Y_{\text{кд}} Y_3 - i_- Y_3 + i_+ Y_{\text{кд}} + i_+ Y_0 + e_{\text{см}} Y_3 Y_{\text{кд}} + e_{\text{см}} Y_3 Y_0)}{Y_{\text{кд}} Y_3 + Y_0 Y_3 + Y_{\text{вх}} Y_3 + Y_{\text{кд}} Y_{\text{вх}} + Y_0 Y_{\text{вх}} - KY_{\text{кд}} Y_0 - KY_2^2}. \quad (5)$$

Для идеального преобразователя $K \rightarrow \infty$ и $Y_{\text{вх}} = 0$, тогда

$$U_{\text{выхидеал}}(p) = -\frac{-U_{\text{вх}} Y_{\text{кд}} Y_3 - i_- Y_3 + i_+ Y_{\text{кд}} + i_+ Y_0 + e_{\text{см}} Y_3 Y_{\text{кд}} + e_{\text{см}} Y_3 Y_0}{Y_{\text{кд}} Y_0 + Y_2^2}. \quad (6)$$

Относительная погрешность выходного напряжения будет иметь вид

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{вых}}(p) &= \left| \frac{U_{\text{выхреал}}(p) - U_{\text{выхидеал}}(p)}{U_{\text{выхидеал}}(p)} \right| = \left((U_{\text{вх}} Y_1 Y_3 - e_{\text{см}} Y_1 Y_3 - e_{\text{см}} Y_2 Y_3 + i_- Y_3 - i_- Y_1 - i_- Y_2) \times \right. \\ &\quad \times (Y_1 Y_3 + Y_1 Y_{\text{вх}} + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_{\text{вх}} + Y_3 Y_{\text{вх}}) (Y_1 Y_2 + Y_2^2) \times \\ &\quad \times \left((KY_1 Y_2 + KY_2^2 - Y_1 Y_3 - Y_1 Y_{\text{вх}} - Y_2 Y_3 - Y_2 Y_{\text{вх}} - Y_3 Y_{\text{вх}}) \times \right. \\ &\quad \left. \left. \times (KY_1 Y_2 + KY_2^2 - Y_1 Y_3 - Y_1 Y_{\text{вх}} - Y_2 Y_3 - Y_2 Y_{\text{вх}} - Y_3 Y_{\text{вх}}) \right)^{-1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Упростим выражение (7), считая $i_- = i_+ = i_{\text{см}}$ и подставляя значения проводимостей, получим

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{вых}}(p) &= (g_{\text{вх}} C_3 p (C_1 C_2 g_3 e_{\text{см}} p - C_1 C_3 g_3 U_{\text{вх}} p + C_1 C_3 g_3 e_{\text{см}} p + \\ &\quad + C_0 C_1 i_{\text{см}} p - C_1 G_1 g_3 U_{\text{вх}} - C_3 G_1 g_3 U_{\text{см}} + C_3 G_1 g_3 e_{\text{см}} + C_0 G_1 i_{\text{см}}) (C_1 + C_2)) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left((C_1 C_2 U_{\text{BX}} p + C_1 C_3 U_0 p - C_1 C_3 e_{\text{CM}} p + C_1 g_1 U_{\text{BX}} - C_1 G_1 e_{\text{CM}} + C_3 G_1 U_{\text{BX}} - C_3 G_1 e_{\text{CM}} + C_1 i_{\text{CM}}) \times \right. \\ & \quad \times G_3 \left(KC_0^2 C_1 p^2 + KC_0^2 G_1 p - C_0 C_1 g_{\text{BX}} p - C_1 C_2 g_{\text{BX}} p - C_1 C_2 g_{\text{BX}} p - \right. \\ & \quad \left. \left. - C_1 C_3 g_{\text{BX}} p - C_2 C_3 g_{\text{BX}} p - C_0 G_1 g_{\text{BX}} - C_1 G_1 g_{\text{BX}} - C_3 G_1 g_{\text{BX}} \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для перехода во временную область удобнее всего воспользоваться математическим символьным аппаратом программного продукта Maple [13]. Для того чтобы осуществить обратное преобразование Лапласа из (8), предварительно разделим это выражение на оператор p , так как формулы записаны по методу Карсона – Хэвисайда:

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{ВЫХ}}(t) = & \left(\frac{1}{KC_0 G_1 + G_3} \left((2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}}^2 - 2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}}^2 + \right. \right. \\ & + KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 e_{\text{CM}}^2 + 2KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}}^2 - \\ & - 3KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 U_{\text{CM}} e_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 e_{\text{CM}}^2 - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}}^2 + \\ & + 2KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 e_{\text{CM}}^2 - KC_0^3 C_1 G_1^2 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} + KC_0^3 C_1 G_1^2 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + \\ & + KC_0^3 C_2 G_1^2 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} + 2KC_0^2 C_1^2 G_1 G_3 U_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1 C_2 G_1 G_3 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1 G_3 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} - \\ & \left. \left. - KC_0^2 C_1 C_3 G_1 G_3 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} - KC_0^3 C_1 G_1^2 i_{\text{CM}}^2 \right) \cdot e^{\frac{-KC_0^2 G_1 + C_0 C_1 g_{\text{BX}} + C_1 C_2 g_{\text{BX}} + C_1 C_3 g_{\text{BX}} + C_2 C_3 g_{\text{BX}}}{2KC_1 C_0^2} t} \cdot \sinh\left(\frac{G_1}{2C_1} t\right) \times \right. \\ & \quad \times (C_1 + C_2) g_{\text{BX}} C_3) + \frac{1}{G_3} \left((-C_1 C_2 G_1 G_3 U_{\text{BX}}^2 - C_1 C_2 G_1 G_3 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} + C_1 C_3 G_1 G_3 e_{\text{CM}}^2 - \right. \\ & - C_2 C_3 G_1 G_3 U_{\text{BX}}^2 + C_2 C_3 G_1 G_3 e_{\text{CM}}^2 - C_0 C_1 G_1 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} + C_0 C_1 G_1 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + C_0 C_2 G_1 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} - C_1 C_2 G_3 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + \\ & \left. + C_1 C_3 G_3 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} - C_0 C_1 i_{\text{CM}}^2 \right) \left(e^{\frac{-KC_0^2 G_1 + C_0 C_1 g_{\text{BX}} + C_1 C_3 g_{\text{BX}} + C_2 C_3 g_{\text{BX}}}{2KC_1 C_0^2} t} \cdot \cosh\left(\frac{G_1}{2C_1} t\right) - \right. \\ & \left. - e^{\frac{-C_1 G_1 U_{\text{BX}} + C_1 G_1 e_{\text{CM}} - C_3 G_1 U_{\text{BX}} + C_3 G_1 e_{\text{CM}} - C_1 i_{\text{CM}}}{(C_2 U_{\text{BX}} + C_3 U_{\text{BX}} - C_3 e_{\text{CM}}) C_1} t} \right) \cdot (C_1 + C_2) g_{\text{BX}} C_3) \times \left(KC_0^2 C_1^2 G_1^2 U_{\text{BX}}^2 - 2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} + \right. \\ & + KC_0^2 C_1^2 G_1^2 e_{\text{CM}}^2 - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 U_{\text{BX}}^2 + KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 U_{\text{BX}}^2 - 2KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} + \\ & + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 e_{\text{CM}}^2 - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 U_{\text{BX}}^2 + KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 U_{\text{BX}} e_{\text{CM}} + 2KC_0^2 C_1^2 G_1 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} - 2KC_0^2 C_1^2 G_1 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} - \\ & \left. \left. - KC_0^2 C_1 C_2 G_1 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1 U_{\text{BX}} i_{\text{CM}} - KC_0^2 C_1 C_3 G_1 e_{\text{CM}} i_{\text{CM}} + KC_0^2 C_1^2 i_{\text{CM}}^2 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Практический интерес представляет изменение погрешности при изменении параметров БКД [14, 15]. Для ряда значений параметров ОУ (табл. 1) на рис. 3 приведены графики рассчитанных в программе Maple относительных погрешностей. Из графиков следует, что определяющими являются погрешности от влияния емкостей C_2 , C_3 и предъявляются жесткие требования к опорному элементу и ОУ ИС.

Таблица 1

Параметры исследуемых ОУ

№ ОУ	Параметры ОУ				
	Коэффициент усиления, K	Входные токи, А		ЭДС смещения, В	Входное сопротивление, Ом
i^+		i^-			
1	2500	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^4$
2	50 000	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	10^{-3}	10^6
3	50 000	10^{-9}	10^{-9}	$7 \cdot 10^{-4}$	10^7
4	100 000	10^{-11}	10^{-11}	$7 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^8$

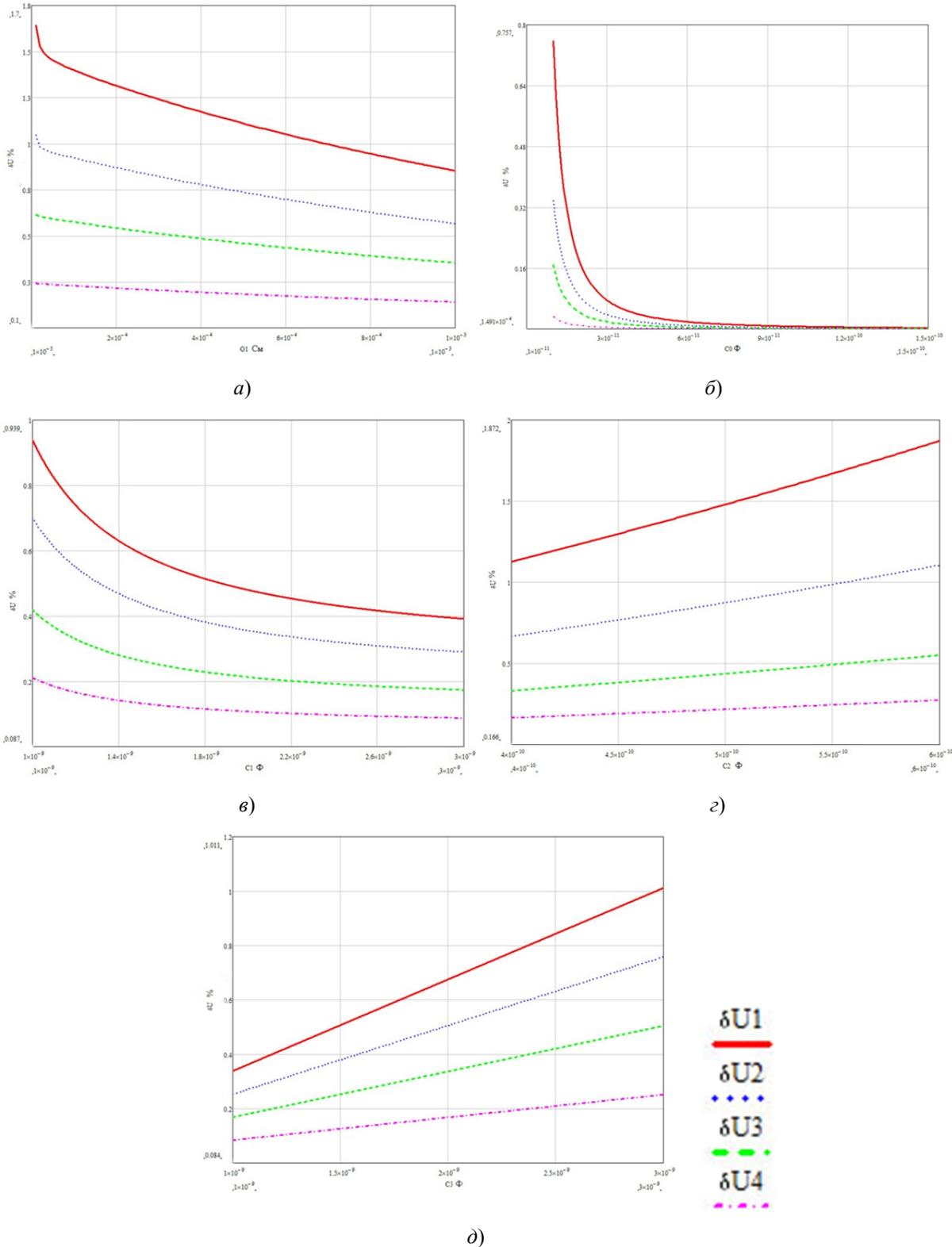


Рис. 3. Графики рассчитанных относительных погрешностей выходного напряжения ИС БКД:
 а – от проводимости контролируемой среды G_1 ; б – от значения опорного конденсатора C_0 ;
 в – от емкости изоляции электродов C_1 ; з – от емкости контролируемой среды C_2 ;
 д – от геометрической емкости C_3

Заключение

По результатам расчета погрешностей в качестве активного элемента ИС рекомендован ОУ КР544УД2 (или МА740), обладающий следующими параметрами: $K = 100\ 000$; $e_{см} = 1,5$ мВ;

$\Delta e_{\text{см}} = 20 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$; $I_{\text{вх}} = 0,05 \text{ нА}$. При этом погрешность ИС во всем диапазоне измерения параметров БКД не превышает 0,4 %. Выбор конкретного ОУ определяется требованиями к быстрдействию ИС и от частоты опорного воздействия.

Список литературы

1. Худякова, Т. А. Кондуктометрический метод анализа : учеб. пособие для вузов / Т. А. Худякова, А. П. Крешков. – М. : Высшая школа, 1975. – 207 с.
2. Лопатин, Б. А. Кондуктометрия: измерение электропроводности электролитов / Б. А. Лопатин. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1964. – 280 с.
3. Комиссаренков, А. А. Кондуктометрия и высокочастотное титрование : учебно-метод. пособие / А. А. Комиссаренков, Г. Ф. Пругло. – СПб. : ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2009. – 42 с.
4. Джапаридзе, П. Д. Эквивалентная электрическая схема емкостного первичного преобразователя влажности с изолированными электродами / П. Д. Джапаридзе, Р. Н. Месхидзе, В. Е. Пруидзе // Измерительная техника. – 1975. – № 5. – С. 77–79.
5. Грачев, А. В. Анализ погрешностей измерительной схемы инвариантного преобразователя емкости кондуктометрического датчика / А. В. Грачев, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 24–29.
6. Сешу, С. Линейные графы и электрические цепи / С. Сешу, М. Б. Рид. – М. : Высшая школа, 1971. – 448 с.
7. Машошин, П. В. Преобразователь параметров емкостного датчика для диэлькометрических влагомеров / П. В. Машошин, П. П. Чураков, М. Ю. Щербаков // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 24–26.
8. Патент 2483313 Российская Федерация RU МКП G01R27/22. Преобразователь параметров кондуктометрического датчика в напряжение / Грачев А. В., Гудожников Е. С., Чураков П. П. – заявл. 06.10.2011 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
9. Крюков, М. А. Оценка погрешности измерительной схемы емкостных влагомеров / М. А. Крюков, П. В. Машошин, П. П. Чураков // Измерения-2000 : материалы МНТК. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2000. – С. 47–49.
10. Остапенко, А. Г. Анализ и синтез линейных и радиоэлектронных схем с помощью графов: аналоговые и цифровые фильтры / А. Г. Остапенко. – М. : Радио и связь, 1985. – 280 с.
11. Диткин, В. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. Диткин, А. Прудников. – М. : Физматлит, 1961. – 524 с.
12. Мэзон, С. Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мэзон. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 619 с.
13. URL: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple>.
14. Арбузов, В. П. Квазиуравновешенные измерительные цепи датчиков с комплексной схемой замещения параметрического преобразователя / В. П. Арбузов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 253–262.
15. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова ; под ред. А. И. Мартяшина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.

Грачев Андрей Владимирович

начальник отдела технических средств обучения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: andean@mail.ru

Grachev Andrey Vladimirovich

head of technical means education department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.33

Грачев, А. В.

Анализ погрешностей измерительной схемы преобразователя сопротивления бесконтактного кондуктометрического датчика / А. В. Грачев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 96–102.