УДК 621.317.33

А.В.Грачев

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА

A. V. Grachev

ERROR ANALYSIS OF THE MEASURING CIRCUIT OF CONVERTERS OF PARAMETERS OF THE INDUCTIVE SENSOR

Аннотация. *Актуальность и цели*. Индуктивные датчики (ИД) можно использовать в устройствах измерения состава жидких сред, влажности сыпучих и твердых материалов и обеспечивают ряд преимуществ перед более распространенными кондуктометрическими датчиками, например, позволяют осуществить более точные измерения движущихся материалов или находящихся в ампулах агрессивных и токсичных сред. Меньшее распространение индуктивные датчики получили из-за сложности конструкции и появления резонансных эффектов в совокупности с емкостью ИД. Материалы и методы. Анализ погрешностей измерительных схем проведен для четырехэлементной схемы замещения ИД с учетом реальных параметров, используемых в многоканальном преобразователе параметров электрофизических свойств веществ методом теории направленных графов. Результаты. Составлены операторные уравнения выходных напряжений активных измерительных схем, несущих информацию о всех параметрах ИД. 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 ОУ. По значениям погрешности инвариантности были определены диапазоны допустимых измерений значений неинформативных параметров индуктивных датчиков, обеспечивающих заданную погрешность.

A b s t r a c t. Background. The inductive sensors IS can be used in devices of measurement of structure of liquid environments, humidity of loose and solid materials. Inductive sensors provide a number of advantages in front of more widespread konduktometrichesky sensors, for example, allow to carry out more exact measurements of moving materials or the hostile and toxic environment which is in ampoules. Inductive sensors have gained smaller distribution because of complexity of a design and emergence of resonant effects in total with a capacity of IS. Materials and methods. The analysis of errors is carried out for the four-element equivalent circuit of IS taking into account actual parameters, used in the multichannel converter of parameters of electrophysical properties of substances by method of the theory of the directed counts. *Results*. The operator equations of the output tension of the active measuring scheme bearing information on all IDES parameters are worked out. Transition from an operator form of the equations in temporary and the analysis of errors is carried out with use of symbolical transformation in the Maple software product. 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. Ranges of admissible measurements of values of not informative parameters of inductive sensors have been determined by values of an error of invariancy.

Ключевые слова: анализ погрешности, унифицирующие преобразователи параметров электрофизических свойств веществ, схема замещения индуктивного датчика.

K e y w o r d s: the analysis of an error, the unifying converters of parameters of electrophysical properties of substances, the equivalent circuit of the inductive sensor.

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Для получения параметров электрофизических свойств веществ часто используют косвенные методы, основанные на измерении электрических или электромагнитных свойств веществ [1–5]. Отдельную группу составляют устройства, в которых эквивалентная схема первичного преобразователя представляется в виде многоэлементной двухполюсной электрической цепи. По конструкции (виду связи с измерительной схемой) различают преобразователи емкостного типа, которые достаточно исследованы и получили широкое распространение и преобразователи индуктивного типа.

Индуктивные датчики ИД обладают рядом достоинств:

- прочность конструкции,

 – отсутствие прямого контакта с измеряемым веществом, из-за чего можно применять такие датчики в устройствах неразрушающего контроля;

 – значительная чувствительность и точность измерений движущихся материалов, по сравнению с широко распространенными контактными датчиками емкостного типа.

Информативная способность индуктивного датчика в значительной мере определяется погрешностью преобразователя измеряемого параметра. Воспользуемся методикой теории направленных графов для анализа погрешностей измерительной схемы с индуктивным датчиком [6–9].

Схема замещения индуктивного датчика представлена на рис. 1. Основными информативными параметрами датчика являются индуктивность L, емкость C, сопротивление r, определяющие параметры исследуемого вещества и сопротивление R, характеризующее потери в ИД [10–13].



Рис. 1. Схема замещения индуктивного датчика

Проводимость такого датчика в операторной форме будет иметь вид

$$Y_{\rm ug} = pC + G + \frac{g}{1 + pLg},\tag{1}$$

где G = 1/R, g = 1/r.

Для определения значений элементов в схеме замещения ИД предполагается использование инвариантного преобразователя параметров электрофизических свойств веществ с ИД. На рис. 2,a приведена измерительная схема преобразователя значения индуктивности L или сопротивления r ИД в напряжение с использованием селективных методов обеспечения инвариантности. Измерительная схема для получения информации об индуктивности и сопротивлении схемы замещения ИД будет одинакова, отличаться будет дальнейшее преобразование сигнала. На рис. 2,6 представлена измерительная схема преобразователя значения емкости Cв напряжение. Измерение R производится на постоянном токе и не требует подключения к ОУ.





Measuring. Monitoring. Management. Control

В общем случае ИС для анализа погрешностей с использованием графов [6, 9] представлена на рис. 3.



Рис. 3. Измерительная схема ИД в напряжение: *а* – обобщенная схема; *б* – топологический граф

Топологический граф содержит четыре истока, один сток, три контура, зависимые узлы 1 и 2. Работа измерительной схемы описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} e_{+} = e_{-} \frac{Y_{_{BX}}}{Y_{_{22}}} + e_{_{CM}} \frac{Y_{_{3}}}{Y_{_{22}}} + \frac{i_{+}}{Y_{_{22}}} \\ e_{-} = U_{_{BX}} \frac{Y_{_{1}}}{Y_{_{11}}} + e_{+} \frac{Y_{_{BX}}}{Y_{_{11}}} + U_{_{BbIX}} \frac{Y_{_{2}}}{Y_{_{11}}} + \frac{i_{-}}{Y_{_{11}}} \\ U_{_{BbIX}} = -Ke_{-} + Ke_{+} \end{cases}$$

$$(2)$$

Первые два уравнения системы составлены по законам Кирхгофа в соответствии с методом узловых потенциалов. Третьему уравнению соответствуют односторонние передачи входных сигналов дифференциального ОУ на его выход. В формулах системы уравнений: e_- и e_+ – напряжения соответственно на инвертирующем и неинвертирующем входах ОУ; $Y_{11} = Y_1 + Y_2 + Y_{\text{вх}}$ и $Y_{22} = Y_3 + Y_{\text{вх}}$ – собственные проводимости узлов 1 и 2, равные сумме проводимостей всех ветвей, сходящихся соответственно в этих узлах. 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 ОУ $C_{\mu} = 0$.

В операторной форме выходной сигнал ИС, используя формулу Мэзона, будет иметь вид [8, 9]

$$U_{\text{BEX}}(p) = \frac{\sum_{i=1}^{P_i \Delta_i}}{\Delta} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3 + P_4 \Delta_4 + P_5 \Delta_5 + P_6 \Delta_6 + P_7 \Delta_7 + P_8 \Delta_8}{1 - (N_1 + N_2 + N_3)},$$
(3)

где P_i – коэффициент передачи *i*-го пути от истока к стоку; Δ_i – алгебраическое дополнение *i*-го пути; Δ – определитель Мэзона; N_i – коэффициент передачи *i*-го контура:

$$P_{1} = -KU_{\text{BX}} \frac{Y_{1}}{Y_{11}}; P_{2} = KU_{\text{BX}} \frac{Y_{1}}{Y_{11}} \frac{Y_{\text{BX}}}{Y_{22}}; P_{3} = -K \frac{i_{-}}{Y_{11}}; P_{4} = K \frac{i_{-}}{Y_{11}} \frac{Y_{\text{BX}}}{Y_{22}};$$

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

$$P_{5} = K \frac{i_{+}}{Y_{22}}; P_{6} = -K \frac{i_{+}}{Y_{22}} \frac{Y_{_{BX}}}{Y_{11}}; P_{7} = K e_{_{CM}} \frac{Y_{3}}{Y_{22}}; P_{8} = -K e_{_{CM}} \frac{Y_{3}}{Y_{22}} \frac{Y_{_{BX}}}{Y_{11}};$$

$$\Delta_{1} = \Delta_{2} = \Delta_{3} = \Delta_{4} = \Delta_{5} = \Delta_{6} = \Delta_{7} = \Delta_{8} = 1; N_{1} = \frac{Y_{_{BX}}^{2}}{Y_{11}Y_{22}}; N_{2} = -K \frac{Y_{2}}{Y_{11}}; N_{3} = K \frac{Y_{2}Y_{_{BX}}}{Y_{11}Y_{22}}.$$
(4)

После подстановки (4) в (3) и учитывая, что $Y_{22} = Y_3 + Y_{BX}$ и $Y_{11} = Y_1 + Y_2 + Y_{BX}$, напряжение на выходе будет иметь вид

$$U_{\rm BHX\,pean}(p) = \frac{K(-U_{\rm BX}Y_1Y_3 - i_{-}Y_3 + i_{+}Y_1 + i_{+}Y_2 + e_{\rm cM}Y_3Y_1 + e_{\rm cM}Y_3Y_2)}{Y_1Y_3 + Y_2Y_3 + Y_{\rm BX}Y_3 + Y_1Y_{\rm BX} + Y_2Y_{\rm BX} - KY_1Y_2 - KY_2^2}.$$
(5)

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

$$U_{\rm BMX \, \text{идеал}}(p) = -\frac{-U_{\rm BX}Y_1Y_3 - i_-Y_3 + i_+Y_1 + i_+Y_2 + e_{\rm cM}Y_3Y_1 + e_{\rm cM}Y_3Y_2}{Y_1Y_2 + Y_2^2}.$$
(6)

Относительная погрешность выходного напряжения будет иметь вид

$$\delta U_{\text{BMX}}(p) = \left| \frac{U_{\text{BMX}\text{pear}}(p) - U_{\text{BMX}\text{H}\text{qear}}(p)}{U_{\text{BMX}\text{H}\text{qear}}(p)} \right| = \left| \frac{\left(\left(\left(U_{\text{BX}}Y_{1}Y_{3} - e_{\text{cM}}Y_{1}Y_{3} - e_{\text{cM}}Y_{2}Y_{3} + i_{-}Y_{3} - i_{-}Y_{1} - i_{-}Y_{2} \right) \times \left(Y_{1}Y_{3} + Y_{1}Y_{\text{BX}} + Y_{2}Y_{3} + Y_{2}Y_{\text{BX}} + Y_{3}Y_{\text{BX}} \right) \left(Y_{1}Y_{2} + Y_{2}^{2} \right) \right) \right|}{\left(\left(KY_{1}Y_{3} + Y_{1}Y_{\text{BX}} + Y_{2}Y_{3} - Y_{1}Y_{3} - Y_{1}Y_{\text{BX}} - Y_{2}Y_{3} - Y_{2}Y_{\text{BX}} - Y_{3}Y_{\text{BX}} \right) \times \left(Y_{1}Y_{2} + KY_{2}^{2} - Y_{1}Y_{3} - Y_{1}Y_{3} - Y_{1}Y_{3} - Y_{2}Y_{3} - Y_{2}Y_{\text{BX}} - Y_{3}Y_{\text{BX}} \right) \times \left(Y_{1}Y_{2} + KY_{2}^{2} - Y_{1}Y_{3} - Y_{1}Y_{3} + e_{\text{cM}}Y_{1}Y_{3} + e_{\text{cM}}Y_{2}Y_{3} - i_{-}Y_{3} + i_{+}Y_{1} + i_{+}Y_{2} \right) \right)}$$

$$(1)$$

Упростим полученное выражение (7), считая $i_{-} = i_{+} = i_{cM}$ и подставляя значения проводимостей: $Y_2 = G_0 - для$ преобразователей индуктивности и сопротивления, $Y_1 = pC_0 - для$ преобразователя емкости, уравнения погрешностей в операторной форме примут вид:

а) для преобразователей индуктивности и сопротивления (опорный элемент G_0):

$$\delta U_{\text{BMXL},R}(p) = \begin{pmatrix} \left(CL(G_3 + G_{\text{BX}}) p^2 + L((G + G_0 + G_3)G_{\text{BX}} + G_3(G + G_0)) p + G_3 + G_{\text{BX}})g + \\ + C(G_3 + G_{\text{BX}}) p + (G + G_0 + G_3)G_{\text{BX}} + G_3(G + G_0) \right) / \left(\left(CL(KG_0 - G_3 - G_{\text{BX}}) p^2 - \\ - \left(\left(G + G_0 + G_3 \right)G_{\text{BX}} + \left(KG_0 - G_3 \right)(G + G_0) \right) Lp + KG_0 - G_3 - G_{\text{BX}} \right) g + C(KG_0 - \\ -G_3 - G_{\text{BX}}) p - (G + G_0 + G_3)G_{\text{BX}} + \left(KG_0 - G_3 \right)(G + G_0) \end{pmatrix} \end{cases}; (8)$$

б) для преобразователя емкости (опорный элемент С₀):

$$\delta U_{\text{BLIXC}}(p) = \begin{cases} \left(\left(Lg(G_3 + G_{\text{BX}})(C + C_0\right) p^2 + \left(L\left((G + G_3)G_{\text{BX}} + GG_3 \right)g + (G_3 + G_{\text{BX}})(C + C_0 \right) \right)p + \\ + (G_3 + G_{\text{BX}})g + (G + G_3)G_{\text{BX}}g + (G + G_3)G_{\text{BX}} + GG_3)(pLg + 1) \right) / (KCL^2g^2(C + C_0))p^4 - L\left((C + C_0)G_{\text{BX}} + (C + C_0)G_3 - GK(2C + C_0) \right)g - 2KC(C + C_0) Lgp^3 - \\ - \left(L\left(\left((G + G_3)G_{\text{BX}} - G(KG - G_3) \right)L - K\left(2C + C_0 \right) \right)g^2 + 4L\left((C + C_0)G_{\text{BX}} + (C + C_0)G_3 - KG(2C + C_0) \right)g - 2KC(C + C_0) \right)g^2 + \\ + (C + C_0)G_3 - KG(2C + C_0) g - 2KC(C + C_0) p^2 + \left((2KG - G_3 - G_{\text{BX}})Lg^2 + \\ + \left(\left((2KG^2 - 2G_{\text{BX}}(G + G_3) - 2GG_3)L + K(2C + C_0) \right)g - (C + C_0)(G_{\text{BX}} + G_3) + \\ + KG(2C + C_0) p + Kg^2 + (2KG - G_3 - G_{\text{BX}})g - (G + G_3)G_{\text{BX}} + G(KG - G_3) \right) \end{cases}$$
(9)

Measuring. Monitoring. Management. Control

2018, Nº 3 (25)

Как видно из формул (8) и (9), на погрешность не влияют токи $i_{-} = i_{+} = i_{cm}$ и напряжение смещения e_{cm} из-за наличия дифференциальных входов ОУ. Для вычислений в области Лапласа и перехода во временную область использована программа Maple [14]. Полученные уравнения во временной форме занимают несколько страниц, поэтому считаю возможным не приводить их, а ограничиться результатами вычислений погрешностей преобразования для параметров обобщенной схемы замещения с использованием ОУ из табл. 1.

Таблица 1

Номер	Коэффициент	Входные токи, А			Входное
ОУ	усиления, К	i^+	ī	ЭДС смещения, Б	сопротивление, Ом
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}	$7 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{8}$

Параметры исследуемых ОУ

Для измерительной схемы параметра С графики погрешностей будут иметь вид рис. 4.



Рис. 4. Графики погрешностей для измерительной схемы С

Для измерительной схемы параметров *L* и *r* погрешности будут выглядеть следующим образом (рис. 5).

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

84



Рис. 5. Графики погрешностей для измерительных схем r и L

Заключение

По результатам расчета погрешностей в качестве активного элемента ИС рекомендован ОУ № 3, а при использовании ОУ № 4 нужно опасаться локальных экстремумов из-за проявления резонансных свойств ИД. При этом погрешность ИС во всем диапазоне измерения параметров ИД не превышает 1,5 %. Выбор конкретного ОУ определяется требованиями к быстродействию ИС и от частоты опорного воздействия [15–17].

Библиографический список

- 1. Измерения в промышленности. Кн. 3. Способы измерения и аппаратура : справ. изд. в 3 кн. ; пер. с нем. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – 344 с.
- 2. Берлинер, М. А. Измерение влажности / М. А. Берлинер. М. : Энергия, 1973. 400 с.
- 3. *Надь, Ш. Б.* Электрометрия / Ш. Б. Надь. М. : Энергия, 1976. 199 с.
- 4. Эмэ, Ф. Диэлектрические измерения : пер. с нем. / Ф. Эмэ. М. : Химия, 1976. 224 с.
- Теория и практика экспрессного анализа влажности твердых и жидких материалов / под ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергия, 1980. –240 с.
- 6. *Сешу, С.* Линейные графы и электрические цепи / С. Сешу, М. Б. Рид. М. : Высш. шк., 1971. 448 с.
- 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.
- Добровинский, И. Р. Использование топологических графов для расчета электронных устройств на операционных усилителях : монография / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – 160 с.

- 9. *Мэзон, С.* Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мэзон. М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 619 с.
- 10. *Чураков, П. П.* Измерители параметров катушек индуктивности : моногорафия / П. П. Чураков, Б. Л. Свистунов. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. 180 с.
- 11. *Кнеллер, В. Ю.* Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
- 12. *Мартяшин, А. И.* Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов ; под ред. А. И. Мартяшина. М. : Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
- 13. Ройфе, В. С. Определение значений элементов сложной схемы замещения поляризованных диэлектриков / В. С. Ройфе // Измерительная техника. 1984. № 7. С. 63–64.
- 14. Онлайн-справочник по Maple. URL: http://www.maplesoft.com/support/help/Maple
- 15. *Машошин, П. В.* АЦП для влагомеров сыпучих веществ / П. В. Машошин, В. Ф. Рябов // Приборы и системы управления. 1988. № 2.
- 16. *Мамиконян, Б. М.* Инвариантное измерение информативного параметра индуктивных и емкостных преобразователей / Б. М. Мамиконян, Х. Б. Мамиконян // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 4-2 (9). С. 136–140.
- Баранов, В. А. Универсальный вторичный преобразователь для систем с параметрическими первичными преобразователями информации / В. А. Баранов, А. В. Светлов, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3 (35). – С. 86–94.

Грачев Андрей Владимирович

начальник отдела технических средств обучения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: andrean@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 преобразователей параметров индуктивного датчика / А. В. Грачев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 79–85. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-3-10.