

Информационные технологии

УДК 621.317.33

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ

*П.Д. Головин*¹, *М.В. Чернецов*²

¹ Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

² Пензенский филиал Московского государственного университета технологий и управления
им. К.Г. Разумовского
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Володарского, 6а

Рассматривается метод отдельного измерения параметров датчиков параметрического типа по мгновенным значениям сигнала измерительной цепи, основанный на применении дополнительной операции интегрирования в заданных интервалах времени. Достоинством метода является независимость результата измерения от входного воздействия, универсальность благодаря возможности применения как в переходном, так и установившемся режиме, простая схемная реализация без применения высокоточных радиоэлементов. Для устранения погрешности квантования аналого-цифрового преобразователя при реализации метода в микропроцессорных устройствах предложена цифровая коррекция с использованием второго канала измерения. Приведена имитационная модель для измерения параметров емкостного датчика.

Ключевые слова: параметрический датчик, отдельное измерение, операция интегрирования, схема замещения, метод, цифровая коррекция.

Основной тенденцией развития средств измерений (СИ) физических величин является ужесточение требований к точности и стабильности результатов измерений при расширении функциональных возможностей и снижении затрат на проектирование, изготовление и эксплуатацию за счет упрощения схемной реализации и максимальной унификации элементов [1].

Поэтому проблема совершенствования метрологических и функциональных возможностей СИ параметров датчиков физических величин для исследовательских и производственно-технологических задач является актуальной [2].

При этом наибольшее внимание уделяется измерению параметров датчиков параметрического типа (ПД), являющихся, по сути, сложными объектами исследования, многоэлементные схемы замещения которых применительно к одинарным ПД представляются в виде пассивных двухполюсных электрических цепей (ДЭЦ).

В то же время достигнутые характеристики являются в ряде случаев предельными, зачастую определяемыми погрешностями, вносимыми опорными радиоэлементами, неидеальностью операций аналоговой обработки, влиянием па-

*Павел Дмитриевич Головин, инженер 2-й категории.
Михаил Владимирович Чернецов (к.т.н., доц.).*

$\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ – интервал дискретизации по времени;
 n – целое число.

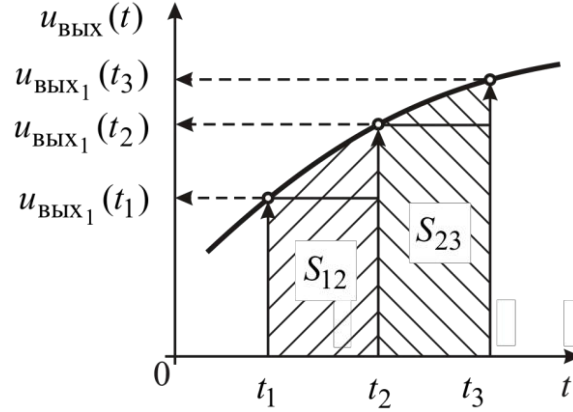


Рис. 2. Графическая интерпретация определенного интеграла

В соответствии со сказанным ранее нахождение параметров ПД сводится к решению системы вида

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{вых}_1}(t_1) = u_{11} &= U_{\text{max}} \beta_- - (U_{\text{max}} \beta_- + U_{\text{max}} \beta_+) \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_0 \beta_-}\right); \\ u_{\text{вых}_1}(t_2) = u_{12} &= U_{\text{max}} \beta_- - (U_{\text{max}} \beta_- + U_{\text{max}} \beta_+) \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_0 \beta_-}\right); \\ u_{\text{вых}_1}(t_3) = u_{13} &= U_{\text{max}} \beta_- - (U_{\text{max}} \beta_- + U_{\text{max}} \beta_+) \exp\left(-\frac{t_3}{\tau_0 \beta_-}\right); \\ S_{12} &= U_{\text{max}} \beta_- \Delta t + \tau_0 \beta_- U_{\text{max}} (\beta_- + \beta_+) \left[\exp\left(-\frac{t_2}{\tau_0 \beta_-}\right) - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_0 \beta_-}\right) \right]; \\ S_{23} &= U_{\text{max}} \beta_- \Delta t + \tau_0 \beta_- U_{\text{max}} (\beta_- + \beta_+) \left[\exp\left(-\frac{t_3}{\tau_0 \beta_-}\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_0 \beta_-}\right) \right], \end{aligned} \right\} (2)$$

где $\beta_- = \frac{R_x}{R_{21} + R_{22} + R_x}$ – коэффициент отрицательной ОС;

$\beta_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_3}$ – коэффициент положительной ОС;

$S_{12} \cong \frac{\Delta t}{2}(u_{11} + u_{12})$, $S_{23} \cong \frac{\Delta t}{2}(u_{12} + u_{13})$;

$\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ – интервал дискретизации;

$\tau_0 = (R_{21} + R_{22})C_x$;

U_{max} – напряжения насыщения ОУ DA_1 .

Умножив первое уравнение (2) на $-\tau_0 \beta_-$, второе – на $\tau_0 \beta_-$ и сложив их с

четвертым уравнением (2), далее проделав те же действия со вторым, третьим и пятым уравнениями (2), получим линейную систему

$$\left. \begin{aligned} S_{12} - u_{11}\tau_0 \beta_- + u_{12}\tau_0 \beta_- &= U_{\max} \beta_- \Delta t; \\ S_{23} - u_{12}\tau_0 \beta_- + u_{13}\tau_0 \beta_- &= U_{\max} \beta_- \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ее решение имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \beta_- &= \frac{(u_{12} + u_{13})(u_{12} - u_{11}) - (u_{11} + u_{12})(u_{13} - u_{12})}{2U_{\max} (2u_{12} - u_{11} - u_{13})}; \\ R_x &= \frac{(R_{21} + R_{22})\beta_-}{1 - \beta_-}; \quad C_x = \frac{U_{\max} \Delta t - S_{12}/\beta_-}{R_2(u_{12} - u_{11})}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для исключения влияния U_{\max} на конечный результат измерения необходимо сформировать второй канал измерения $u_{\text{ВЫХ}_2}(t)$ (см. рис. 1). При этом

$$u_{\text{ВЫХ}_2}(t) - u_{\text{ВЫХ}_1}(t)\beta_+ = U_{\max} \beta_+, \quad (5)$$

откуда

$$U_{\max} = \frac{u_{\text{ВЫХ}_2}(t)}{\beta_+} - u_{\text{ВЫХ}_1}(t). \quad (6)$$

Введение цифровой коррекции для обеспечения независимости измерения от шага квантования АЦП

Для устранения погрешности квантования разработана цифровая коррекция, использующая второй канал измерения $u_{\text{ВЫХ}_2}(t)$. Так, при $R_{21} = R_{22}$ и обеспечении коэффициента положительной ОС ОУ $\beta_+ = 0,5$ устанавливается следующая взаимосвязь:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t) - \beta_+ u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t) &= \beta_+ U_{\max} \pm \Delta u_k; \\ \Delta u_{\text{ВЫХ}_2}(t) - \beta_+ \Delta u_{\text{ВЫХ}_1}(t) &= \pm \Delta u_k, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t)$, $u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t)$ – оцифрованные сигналы АЦП;

$\Delta u_{\text{ВЫХ}_1}(t) = u_{\text{ВЫХ}_1}(t) - u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t)$ и $\Delta u_{\text{ВЫХ}_2}(t) = u_{\text{ВЫХ}_2}(t) - u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t)$ – погрешности квантования первого и второго канала измерений;

$\Delta u_k = e_s(t)_{\max} / 2^{m-1}$ – значение шага квантования для АКС [7];

m – разрядность АЦП.

Используя три пары оцифрованных значений напряжений $u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t)$ и $u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t)$, можно исключить влияние U_{\max} на результат измерения, при этом найдя его вычисленное аналоговое значение:

$$U_{\max} = \frac{\langle u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t + \Delta t) - \beta_+ u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t + \Delta t) \rangle_{\min} + \langle u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t) - \beta_+ u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t) \rangle_{\min}}{2}. \quad (8)$$

Правой части второго уравнения (7) присваивается положительное значение

для момента времени $\left\langle u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t + \Delta t) - \beta_+ \cdot u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t + \Delta t) \right\rangle_{\min}$, а отрицательное – $\left\langle u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t) - \beta_+ u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t) \right\rangle_{\max}$.

На основе вышеизложенного составляется линейная система из двух уравнений с двумя неизвестными относительно Δu_k , которая позволит исключить погрешность квантования АЦП:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{\text{ВЫХ}_{2}}(t) + u_{\text{ВЫХ}_{2к}}(t) - \beta_+ (\Delta u_{\text{ВЫХ}_{1}}(t) + u_{\text{ВЫХ}_{1к}}(t)) &= \beta_+ U_{\max}; \\ \Delta u_{\text{ВЫХ}_{2}}(t) - \beta_+ \Delta u_{\text{ВЫХ}_{1}}(t) &= \Delta u_k, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где U_{\max} вычисляется по (8).

Имитационное моделирование и исследование погрешности разработанного метода

Для проверки полученных теоретическим путем результатов с использованием программного продукта MatLab/Simulink составлена имитационная модель СИ (рис. 3) и исследована для следующих исходных данных: $U_{\max} = 15$ В, $U_{\text{см}} = 0,1$ В – напряжение смещения ОУ, $R_1 = R_3 = 100$ кОм, $R_{21} = R_{22} = 25$ кОм, а $R_x = 500$ кОм и $C_x = 1$ нФ – неизвестные величины, где АЦП – аналого-цифровой преобразователь с поразрядным уравниванием [7], МПУ – микропроцессорное устройство, реализующее вычисление по (4). Результаты измерений и расчетов занесены в таблицу для $m = 10$.

В основу модели ОУ положен управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source, передаточная функция которого определяется выражением [8]

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + p\tau}, \quad (10)$$

где K_0 – коэффициент передачи ОУ на постоянном токе;

$\tau = \frac{K_0}{2\pi f_1}$ – постоянная времени передаточной функции ОУ;

f_1 – частота единичного усиления.

Для того чтобы принудительно задать ненулевые начальные условия, требуется установить в схему блок Powergui-Continuous и ввести начальное значение в меню Initial State Setting равным $\beta_+ U_{\max} - U_{\text{см}}$.

На рис. 4 показана зависимость относительной погрешности СИ с использованием разработанного метода от трех значений интервалов дискретизации Δt ($\Delta t_1 = \frac{\tau_0}{5}$, $\Delta t_2 = \frac{\tau_0}{25}$ и $\Delta t_3 = \frac{\tau_0}{50}$) при применении и без применения цифровой коррекции. При моделировании было установлено, что при применении цифровой коррекции достаточно 10-разрядного АЦП, при этом погрешность измерения параметров ПД зависит только от погрешности метода измерения.

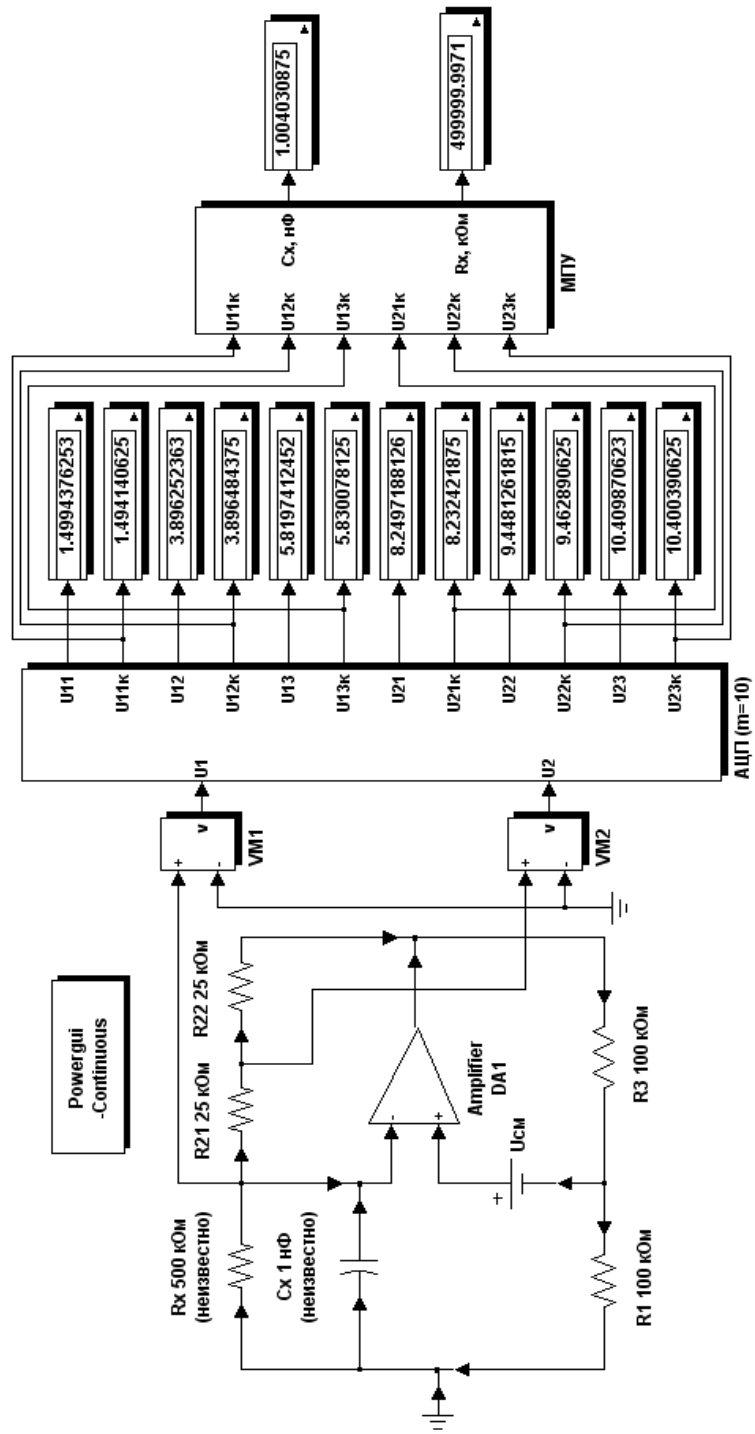


Рис. 3. Иммитационная модель СИ с цифровой коррекцией

Результаты измерений при $t_1 = 3 \cdot 10^{-5}$, $\Delta t \cong \tau_0/5$ и $m = 10$

i	$u_{2i} - \beta_+ u_{1i}$	Значение	Погрешность квантования	
			Δu_{1i}	Δu_{2i}
1	7,4853515625	min	0,005297	0,017296937
2	7,5146484375	min	-0,000232012	-0,01476444
3	7,4853515625	max	-1,0133688	0,00948

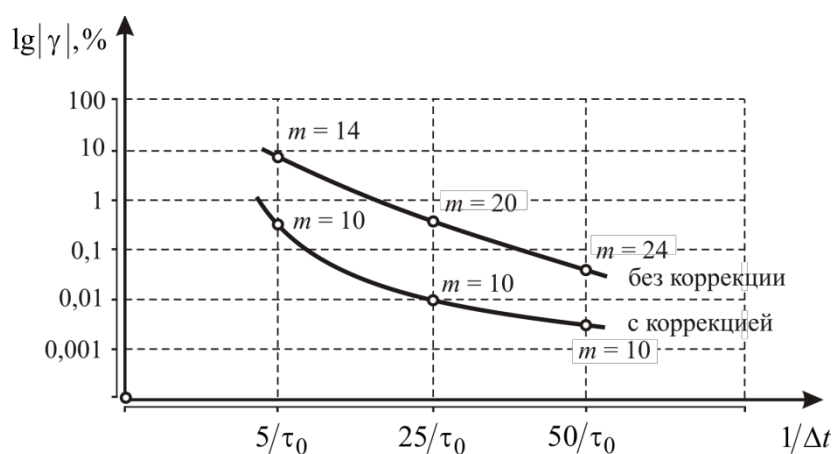


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности СИ от интервала дискретизации Δt

Для емкостного ПД предпочтительным является заземленное положение в цепи отрицательной ОС как с последовательной, так и с параллельной схемой замещения, для индуктивного ПД – незаземленное. Это связано, во-первых, с формированием второго канала измерения, а во-вторых, с невозможностью применения метода.

Разработанный метод обладает широкими функциональными возможностями вследствие его применимости и для пассивного делителя напряжения с входным воздействием в виде синусоидального или пилообразного напряжения как в установившемся, так и в переходном режиме.

Разработанный метод отличается простотой реализации, не требующей использования высокоточных радиоэлементов, и при этом имеет широкие функциональные возможности, а в тандеме с алгоритмом цифровой коррекции позволит исключить погрешность квантования, т. е. сделать процесс измерения независимым от разрядности АЦП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брюханов В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 108 с.
2. РМГ 64-2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений.
3. Разделение параметров в датчиках и измерительных системах путем обработки сигнала: Кон-

- трольно-измерительная техника // Экспресс-информация. – Реферат 58. – 2002. – №12. – С.3-10.
4. *Лосев В.В.* Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 132 с.
 5. *Аш Ж. и др.* Датчики измерительных систем: В 2 кн. Кн. 1 / Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
 6. *Бертмант А.Ф., Араманович И.Г.* Краткий курс математического анализа для вузов. – М., 1971. – 736 с.
 7. *Никамин В.А.* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: Справочник. – СПб.: Корона Принт; М.: Альтекс-А, 2003. – 224 с.
 8. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2014 г.

THE METHOD OF SUCCESSIVE INTEGRATION FOR MEASUREMENT SENSORS

P.D. Golovin¹, M.V. Chernetzov²

¹ Penza State University
40, Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation

² Penza branch of moscow state university of technologies and management named
K.g. Razumovsky
6A, Volodarskogo st., Penza, 440026, Russian Federation

The paper deals with the method of separate measurement of the parametric sensor parameters using instantaneous values of the measuring circuit signal based on the application of additional integration operation within specified time period. This method has three main advantages: 1). the result of measurement doesn't depend on the input signal; 2). this method is versatile as it can be used both in transient mode and sustained mode; 3). simple circuit without high-precision electric components. In order to eliminate the quantization error of the AD converter when using this method on the microprocessor based unit, digital correction using the second measurement channel is proposed. The simulation model for measurement of the capacitive sensor parameters is given.

Keywords: *parametric sensor, separate measurement, the integrating circuit, the method, the digital correction.*

*Pavel D. Golovin, 2-nd category engineer.
Mihail V. Chernetzov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*