

Модель для оптимизации настроечных коэффициентов программно-аппаратного измерительного канала

В.П. Шевчук, Е.Ю. Силаева

*Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного
технического университета*

Аннотация: В работе рассмотрена структура программно-аппаратного измерительного канала, которая состоит из четырёх последовательно соединённых элементов. Для каждого из блоков построены математические модели. Найдена погрешность для измерительного канала. По полученной модели приведены настройки измерительного канала, которые оказывают влияние на погрешность измерения. Полученная модель может применяться для идентификации текущих параметров систем управления.

Ключевые слова: модель измерительного канала, модель первичного преобразователя, настройка коэффициентов, погрешность измерительного канала.

Введение. При разработке крупных информационно-измерительных и управляющих систем особое внимание необходимо уделить взаимодействию различных блоков системы друг с другом. Для этого применяется аппаратно-программное моделирование, при этом блоки реализуются в виде моделей [1, 2].

Структура программно-аппаратного измерительного канала газоанализатора, показанная на рисунке 1, представляет собой последовательное соединение четырех преобразователей:

- 1) динамическое преобразование аналоговой измерительной информации (первичный преобразователь);
- 2) преобразователь формы сигнала, осуществляющий процесс измерения (аналого-цифровой преобразователь);
- 3) программный динамический преобразователь;
- 4) цифро-аналоговое преобразование [3].

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $X(t)$ – измеряемая физическая величина; $Y(t)$ – выходная величина программно-аппаратного

измерительного канала; $h_p(t)$ – эквивалентная весовая функция аналоговой части измерительного канала газоанализатора; МВА – модуль ввода аналогового сигнала; $h_d(i \cdot T_S)$ – эквивалентная весовая функция программной части измерительного канала газоанализатора; $h_r(t)$ – весовая функция восстанавливающего элемента; $E_q(i \cdot T_S)$ – ошибка квантования по уровню в аналого-цифровом преобразователе; T_S – период опроса газоанализатора, с; i – дискретный момент времени.

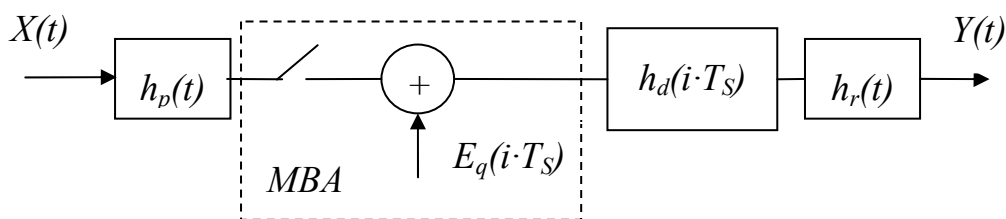


Рис. 1. – Структура программно-аппаратного измерительного канала

Постановка задачи. Анализ рис. 1 показывает, что динамическая характеристика программно-аппаратного измерительного канала газоанализатора, $h_{\Pi}(t)$, может быть представлена сверткой четырех динамических характеристик вышеупомянутых элементов измерительного канала:

$$h_{\Pi}(i \cdot T_C) = h_p(i \cdot T_C) \cdot \delta(i \cdot T_C - i \cdot T_S) \cdot h_d(i \cdot T_S) \cdot h_r(i \cdot T_S), \quad (1)$$

где T_C – время измерения, $\delta(i \cdot T_C - i \cdot T_S)$ – динамическая характеристика аналого-цифрового преобразования (функция окно – модель процесса измерения).

Весовая функция большинства первичных преобразователей имеет вид:

$$h_p(t) = \frac{k_p}{T_p} \cdot e^{-\frac{t}{T_p}}, \quad (2)$$

где T_p – постоянная времени;

k_p – коэффициент передачи.

Математическую модель периодического отбора целесообразно представить в виде стационарной случайной периодизированной последовательности [4, 5]:

$$\delta(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \delta(i \cdot T_C), \quad (3)$$

где $\sum_{i=0}^{N-1}$ – знак последовательности; N – количество измерений на k -той циклограмме.

Имитационное моделирование программно-аппаратного измерительного канала.

Если предположить, что ошибка от квантования по уровню является аддитивно наложенной коррелированной помехой с уровнем шума $S=0.5$: $E_q(i \cdot T_S) = \text{rnd}(h_p(i \cdot T_S) \cdot 0.01) - h_p(i \cdot T_S) \cdot 0.005$, и автокорреляционной функцией экспоненциального вида: $R_{II}(i \cdot T_S) = 0.241 \cdot e^{-2.5 \cdot i \cdot T_S}$, то сигнал на выходе модуля ввода аналоговой информации можно описать математической моделью: $X_g(i \cdot T_S) = h_p(i \cdot T_S) + E_q(i \cdot T_S)$.

Компенсацию динамических свойств первичного преобразователя целесообразно осуществлять методом экспоненциального сглаживания. Алгоритм экспоненциального сглаживания представляет собой рекуррентное соотношение, определяющее текущее значение программного динамического преобразователя $Y(i \cdot T_S)$ через текущее значение измеряемой физической величины и предыдущего значения программного преобразователя:

$$Y(i \cdot T_S) = Y((i-1) \cdot T_S) + \frac{T_S}{T_f} [X_g(i \cdot T_S) - Y((i-1) \cdot T_S)],$$

где T_f – постоянная времени интегрирования программного преобразователя.

При этом динамический компенсатор имеет весовую функцию вида [4]:

$$h_d(i \cdot T_S) = \begin{cases} \frac{T_S}{T_f} \cdot \left(1 - \frac{T_S}{T_f}\right)^i, & \text{при } i = 1, 2, \dots, N, \\ 0, & \text{при } i = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

Далее сигнал в виде решётчатой функции $Y(iT_S)$ подаётся на вторичный прибор для визуализации (монитор, планшет, дисплей компьютера и т.п.) весовая функция которого имеет вид [4]:

$$h_r(t) = \begin{cases} 1/T_S, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

Применение восстанавливающего элемента нулевого порядка (5) (элемент запоминания) позволяет преобразовать решетчатую функцию $Y(jT_S)$ в ступенчатую функцию выходного сигнала измерительного канала. [6].

При этом методическая составляющая погрешности обработки информации возникающая в программно-аппаратном измерительном канале газоанализатора вычисляется как: $\Delta(i \cdot T_C) = h_p(i \cdot T_C) - Y(i \cdot T_C)$. Статистические характеристики погрешности обработки информации будет иметь следующие значения: оценка математического ожидания ошибки $M_\Delta = -0.16$, оценка дисперсии ошибки $D_\Delta \approx 0.23$ (см. рис.2).

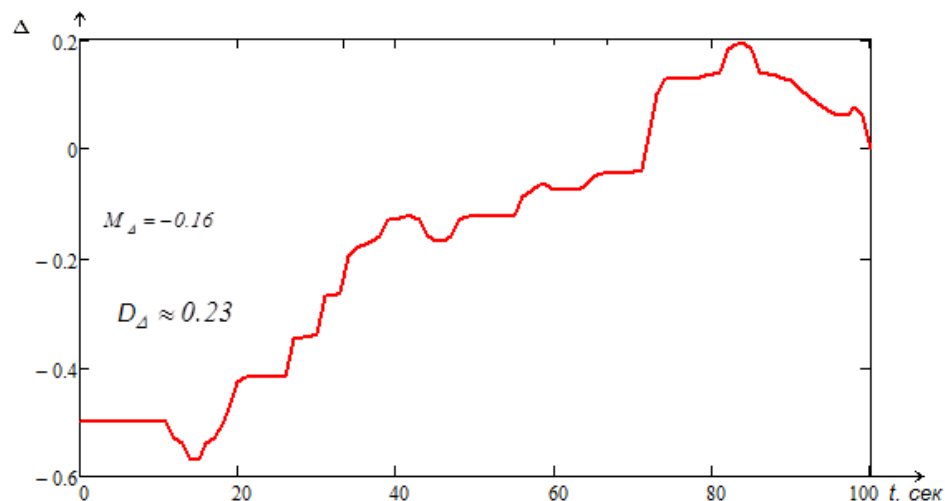


Рис 2. Погрешность программно-аппаратного измерительного канала газоанализатора ($T_C = 1$ с, $K_P = 100$, $T_P = 20$ с, $T_S = 3$ с, $T_P = 100$, $\alpha=1/T_P=0.05$ Гц).

Как видно, из анализа математических моделей элементов измерительного канала (2–5), программное обеспечение измерительного

канала имеет семь настроек: время измерения физической величины – T_C , диапазон дросселирования сигнала газоанализатора (коэффициент передачи умноженный на 100%) – K_P , постоянная времени интегрирования первичного преобразователя – T_P , период опроса первичного преобразователя – T_S , постоянная времени интегрирования программного преобразователя – T_f , скорость изменения физической величины – $\alpha=1/T_P$, G_u , и длина реализации – $N=50T_S$ [3]. Из них, четыре отражают свойства измеряемой физической величины и аппаратной части измерительного канала (α , T_P , K_P , и T_C), а три другие (T_S , T_f , и N) являются настройками программного обеспечения системы измерительного канала.

Таким образом, используя модель формирования динамической погрешности процессорного измерительного канала, подробно описанную в работах [3, 4, 7, 8], можно получить модель для оптимизации настроек программного обеспечения, которая будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{T_S, T_f} \eta_{\Delta} \Rightarrow \left[\frac{T_S}{2 \cdot T_f - T_S} \cdot \left[\left(\frac{S}{2 \cdot T_P \cdot D_X} - \frac{\alpha \cdot T_P}{1 - (\alpha \cdot T_P)^2} \right) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \frac{T_f + e^{-T_s/T_p} \cdot (T_f - T_S)}{T_f - e^{-T_s/T_p} \cdot (T_f - T_S)} + \frac{1}{1 - (\alpha \cdot T_P)^2} \cdot \frac{T_f + e^{-\alpha T_s} \cdot (T_f - T_{SS})}{T_f - e^{-\alpha T_s} \cdot (T_f - T_S)} \right] - \right. \\ \left. - \frac{2}{D_X} \min[K_{YZ}^0(0), K_{YZ}^1(0)] + 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \\ \text{при ограничениях вида:} \\ K_{YZ}^{\xi}(0) = \frac{T_S \cdot D_X}{1 - \alpha \cdot T_P} \cdot \left(\frac{e^{-\alpha T_s \xi}}{T_f - e^{-\alpha T_s} (T_f - T_S)} - \frac{2 \cdot \alpha \cdot T_P}{1 + \alpha \cdot T_P} \cdot \frac{e^{-T_s \xi / T_p}}{T_f - e^{-T_s / T_p} \cdot (T_f - T_S)} \right), \\ \min[K_{YZ}^0(0), K_{YZ}^1(0)] = \begin{cases} K_{YZ}^0(0), & \text{если } K_{YZ}^0(0) \leq K_{YZ}^1(0), \\ K_{YZ}^1(0), & \text{если } K_{YZ}^0(0) > K_{YZ}^1(0), \end{cases} \\ T_Y \geq T_S \geq 1; \quad T_S \leq T_f \leq 10 \cdot T_S; \end{array} \right. \quad (6)$$

где D_X – оценка дисперсии измеряемой физической величины; α – скорость изменения физической величины; S – уровень помехи; $K_{YZ}(i \cdot T_S)$ – оценка

взаимокорреляционной функции истинных значений измеряемой величины $Y[i \cdot T_S]$ и показаний программно-аппаратного $Z(i \cdot T_S)$ измерительного канала.

Предлагаемая математическая модель позволяет найти настроечные коэффициенты программного обеспечения измерительного канала, которые обеспечивают минимальные потери информации в программно-аппаратном измерительном канале, у таких вторичных приборов, как газоанализаторы. Как видно, из модели (6), относительная погрешность измерения и визуализации зависит как от параметров, которые отражают свойства измеряемой физической величины и аппаратной части измерительного канала (α , S , T_P , K_P , и T_C), так и параметров, которые являются настройками программного обеспечения измерительного канала (T_S , T_f , и N).

Заключение. Модель для оптимизации настроечных коэффициентов программно-аппаратного измерительного канала (6) имеет минимум и может быть использована в системах автоматического управления для текущей идентификации настроек регуляторов. Подобные решения по идентификации параметров приведены в работах [9, 10].

Литература:

1. Шайкин А. С., Шайкина Е. В. Применение комплекса полунатурного моделирования в процессе проектирования информационно-измерительных и управляющих систем // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248.
2. Шевчук В.П. Классификация информационно-измерительных систем по типу уравнения измерения для определения критерия управления // Метрология. 2008. №12. С. 3 – 16.

3. Данилов С.И. Параметрический синтез измерительных каналов в автоматизированной системе управления технологическим процессом: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.16. Волгоград, 2000. 16 с.
4. Шевчук В.П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 320 с.
5. Шевчук В.П. Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 288 с.
6. Шевчук В.П. Информативность и эффективность интеллектуальной измерительной техники // Метрология. 2012. № 1. С. 12-21.
7. Шевчук В.П., Авдеюк О.А. и др. Проблемы определения погрешности визуализации обобщенных критериев управления // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4390.
8. Stroet, P., Measuring Phase and Delay Errors Accurately in I/Q Modulators. Linear Technology, 2005. 102. Date Views 18.11.2017 URL: cds.linear.com/docs/en/application-note/an102f.pdf.
9. Браганец С.А., Гольцов А.С., Савчиц А.В. Идентификация математической модели главного золотника для системы диагностики и адаптивного управления открытием направляющего аппарата // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1906.
10. Astrom K.J. Advanced PID control. –ISA. Triangle Park, 2006. 446 p.

References:

1. Shaykin A. S., Shaykina E. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2248.
 2. Shevchuk V.P. Metrologija. 2008. №12. pp. 3 – 16.
-

3. Danilov S.I. Parametricheskiy sintez izmeritel'nykh kanalov v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Parametric synthesis of measuring channels in an automated process control system]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.16.. Volgograd, 2000. 16 p.

4. Shevchuk V.P. Modelirovanie metrologicheskikh kharakteristik intellektual'nykh izmeritel'nykh priborov i sistem [Modeling of metrological characteristics of intelligent measuring instruments and systems]. M.: FIZMATLIT, 2011. 320 p.

5. Shevchuk V.P. Raschet dinamicheskikh pogreshnostey intellektual'nykh izmeritel'nykh sistem [Calculation of dynamic errors in intelligent measuring systems]. M.: FIZMATLIT, 2008. 288 p.

6. Shevchuk V.P. Metrologiya. 2012. №1. pp. 12–21.

7. Shevchuk V.P., Avdeyuk O.A. i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4390.

8. Stroet, P., Measuring Phase and Delay Errors Accurately in I/Q Modulators. Linear Technology, 2005. 102. Date Views 18.11.2017 URL: cds.linear.com/docs/en/application-note/an102f.pdf.

9. Braganets S.A., Gol'tsov A.S., Savchits A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1906.

10. Astrom K.J. Advanced PID control. ISA. Triangle Park, 2006. 446 p.