

1. Обзор современных  $\Sigma\Delta$ -АЦП

Широкое распространение  $\Sigma\Delta$ -АЦП получили за счет того, что они обладают высокой надежностью, минимальной потребляемой мощностью, малыми габаритами и низкой стоимостью. В настоящее время производится большое количество высокоточных измерительных  $\Sigma\Delta$ -АЦП, имеющих различную архитектуру.

Высокоточные низкочастотные  $\Sigma\Delta$ -АЦП серийно выпускаются следующими фирмами: Analog Devices, Linear Technology, Maxim Integrated Products, Microchip Technology, Texas Instruments, Xemics, Cypress Microsystems. Продукция данных фирм является передовой в измерительных технологиях и позволяет охарактеризовать достижения в области  $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровых преобразователей. В табл. 1 приводится краткий обзор технических характеристик  $\Sigma\Delta$ -АЦП, серийно выпускаемых ведущими мировыми фирмами, в которой указаны разрядность  $\Sigma\Delta$ -АЦП, порядок  $\Sigma\Delta$ -модулятора, тип цифрового фильтра, частота следования выходных отсчетов и степень подавления внешних помех.

Таблица 1

Краткий обзор технических характеристик  $\Sigma\Delta$ -АЦП

№	Название	Разрядность АЦП	Модулятор	Фильтр	Fout, Гц	50/60 Гц, Дб
<i>Analog Device</i>						
1	AD7701	16	2	Гаусса	5/10/4000	55/90
2	AD7703	20	2	Гаусса	5/10/4000	55/90
3, 4	AD7705/06	16	2	sinc3	5...50	100
5	AD7709	16	2	sinc3 + доп.	5...100	100
6–8	AD7712/13/14	12–24 (22,5)	2	sinc3	<1000	100
9	AD7715	16	2	sinc3	20... 500	100
10	AD7716	22	2	sinc3	<140...2232	100
11	AD7719	16/24	2	sinc3 + доп.	5...105	110
12	AD7782	24	2	sinc3 + доп.	20	60/94
13, 14	AD7730/31	24	1	sinc3, sinc3 + доп.	800... 6400	88
15	ADuC816	16	2	sinc3 + доп.	5...100	90/70
16	ADuC824	16 + 24	2	sinc3 + доп.	5...100	90/70
17	AD 1555/56	24 (22)	4	Чебышева + доп.	250... 16000	0
<i>Linear Technology Corp.</i>						
18–20	LTC2400/01/02	24(21,6)	3	sinc4	1...120	110
21–28	LTC2410/11/11-1/12/13/14/15/18	24(22,5)	3	sinc4 + доп.	7,5/6,25/6,8	110
29	LTC2440	24(22,5)	3	sinc4 + доп.	6,9...880	110
30,31	LTC2424/28	20	3	sinc4	1...800	110
32, 33	LTC2430/31	20	3	sinc4 + доп.	6,5/7,5	110
<i>Maxim Integrated Products</i>						
34, 35	MAX110/111	+/-14	1	sinc	48... 480	40
36–39	MAX 1400/01/02/03	18(16)	2	sinc, sinc3	<480	100
<i>Microchip Technology Inc.</i>						
40–45	TC3400/01/02/03/04/05	16	1	sinc2	<3500	80
<i>Texas Instruments Inc.</i>						
46	ADS1100	12, 14, 15, 16	2	sinc2	8/16/32/128	80
47	ADS1110	12, 14, 15, 16	2	sinc2	15/30/60/240	80
48, 49	ADS1210/11	24 (20-23)	2	sinc3	<15600	100–140
50, 51	ADS1212/13	16-22	2	sinc3	<62500	100–130
52–54	ADS1216/17/18	22	2	sinc2, sinc3, sinc2 + доп.	<1000	100
55–58	ADS 1240/41/42/43	19–21	2	мод. sinc3 + доп.	3,75/7,5/15	90–130
59	ADS 1244	20	3	мод. sinc3	15	60–100
60	ADS1250	20 (18)	4	sinc5	<25000	160
61–64	ADS 1251/52/53/54	24 (19)	4	sinc5	<40000	160
65	DDC112	20	2	sinc2	2000	80
<i>Xemics SA</i>						
66–68	XE88LC01/03/05	6...16	2	ЦФ, ЦФ + доп.	60... 25000	80
<i>Cypress Microsystems Inc.</i>						
69, 70	CY8C25xxx/26xxx	8/11	1	sinc2	125... 30000	80

В качестве цифровых фильтров в современных  $\Sigma\Delta$ -АЦП наиболее распространены цифровые sinc-фильтры. Обозначение  $\text{sinc}(x)$  довольно часто встречается в теории спектров, оно соответствует функции  $\sin(x)/x$  [1]. Импульсные характеристики (ИХ) таких фильтров образуются сверткой нескольких прямоугольных импульсов во временной области, что соответствует цифровому индексу. Наиболее типичным являются фильтры 3-го, 4-го порядков ( $\text{sinc}3$ ,  $\text{sinc}4$ ).

Как видно из таблицы,  $\Sigma\Delta$ -АЦП ориентированы на измерения низкочастотных сигналов звукового диапазона. В качестве сигма-дельта модулятора ( $\Sigma\Delta$ -модулятора) используются модуляторы 2–4 порядков с простейшими цифровыми фильтрами, относящимися к классу sinc, либо с классическими фильтрами Гаусса и Чебышева. Также нужно отметить, что область использования  $\Sigma\Delta$ -АЦП непрерывно изменяется в область высокочастотных измерений, например в радиосистемах для преобразования промежуточной частоты, оцифровки сигналов и т.д.

### 2. Методы проектирования высокоточных $\Sigma\Delta$ -АЦП

Классическая структура  $\Sigma\Delta$ -модулятора высоких порядков представляет собой структуру интегрирующего дискретизатора (ИД) с многократным интегрированием, в цепи ОС которой включен однобитный ЦАП.

На рис. 1 представлена структура  $\Sigma\Delta$ -модулятора  $k$ -порядка [6].

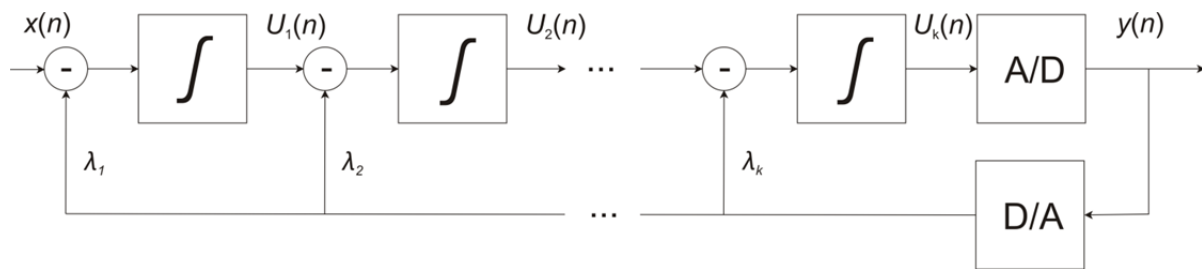


Рис. 1. Структура  $\Sigma\Delta$ -модулятора  $k$ -порядка

Система разностных уравнений, описывающая работу модулятора 3-го порядка в составе  $\Sigma\Delta$ -АЦП, приведена ниже:

$$\begin{cases} U_{1[n]} = U_{1[n-1]} + \varepsilon X_{[n]} - \varepsilon \lambda_1 Y_{[n-1]}; \\ U_{2[n]} = U_{2[n-1]} + \varepsilon U_{1[n-1]} - \varepsilon \lambda_2 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^2}{2!} \lambda_1 Y_{[n-1]} + \frac{\varepsilon^2}{2!} X; \\ U_{3[n]} = U_{3[n-1]} + \varepsilon U_{2[n-1]} + \frac{\varepsilon^2}{2!} U_{1[n-1]} - \varepsilon \lambda_3 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^2}{2} \lambda_2 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^3}{6} \lambda_1 Y_{[n-1]} + \frac{\varepsilon^3}{6} X; \\ Y_{[n]} = \text{sign}(U_{3[n]}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{k[n]}$  – напряжение на выходе  $k$ -го интегратора в моменты времени дискретизации  $t_n = nh$ ;  $h$  – шаг дискретизации;  $n$  – номер шага;  $\varepsilon = h\tau^{-1}$  – относительная постоянная времени интегратора;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – масштабные коэффициенты обратной связи;  $X$  – входной сигнал,  $Y$  – выходной сигнал модулятора.

При проектировании высокоточных  $\Sigma\Delta$ -АЦП основными являются метод имитационного моделирования (например, пакет ПО MathLab Simulink) и метод численных расчетов (анализ методом рядов Вольтера, теория комплексных функций, метод одномерного и многомерного преобразования Лапласа).

На этапе выбора структурно-алгоритмических решений используется для упрощения метод идеализации реальных структур: вводятся модели идеального интегратора, идеального компаратора, исключается инструментальная погрешность, анализ проводится на ограниченном наборе тестовых сигналов. Это позволяет решить задачу оптимизации алгоритма цифровой фильтрации, определить область допустимых значений параметров модулятора по крите-

рию устойчивости, минимизации СКО шума квантования и максимального динамического диапазона.

Как недостатки этого подхода нужно отметить:

- 1) высокую трудоемкость вычислений (объем численных расчетов);
- 2) невозможность интегральной оценки основных характеристик  $\Sigma\Delta$ -АЦП;
- 3) необходимость экспериментальной проверки с целью обеспечения достоверности полученных результатов в ходе численных расчетов;
- 4) невозможность получения простых эмпирических аналитических зависимостей между параметрами структуры и характеристиками АЦП, что является следствием отсутствия аналитических решений систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику процессов в  $\Sigma\Delta$ -модуляторе.

Вторым подходом к проектированию высокоточных  $\Sigma\Delta$ -АЦП является использование свойства подобия на уровне математических моделей нелинейных динамических систем (НДС) детерминированного хаоса.

Свойство подобия в данном случае заключается в том, что математические закономерности, которые получены для определенного класса нелинейных систем, могут быть присущи для другого класса нелинейных систем, поскольку вид нелинейности слабо влияет на закономерности динамических процессов. Такой подход является концептуальным для этапа разработки метода исследования ПИ с нелинейностью класса SIGN. В частности, он позволяет найти аналитические решения задачи устойчивости для частных случаев, выявить эффекты, связанные с нелинейностью, такие как бифуркация частоты, аномально высокая чувствительность к возмущающим факторам, наличие эффекта возникновения периодических колебаний в структуре хаотических колебаний («островки устойчивости»).

Математические закономерности, которые присущи классу нелинейных систем, связаны с так называемым динамическим хаосом, возникновением хаотических колебаний, причиной которых являются не внешние, а внутренние факторы.

Причиной хаотических колебаний могут быть тепловые шумы, фликкер-шумы, нестабильность тактовых частот и опорных напряжений. Поэтому важными вопросами являются выяснение причины хаотических колебаний и разделение их на структурно-алгоритмические, связанные с нелинейностью, и на физические, вызванные физическими факторами, перечисленными выше. Этому вопросу посвящены работы, где в частности указываются методы решения [7]:

1. Чувствительность к изменению начальных условий (измеряемая показателем Ляпунова и границами фрактальной области).
2. Широкий Фурье-спектр движения, возбуждаемого на одной частоте (получаемый быстрым преобразованием Фурье (БПФ) с помощью современных электронных спектроанализаторов).
3. Фрактальные свойства движения в фазовом пространстве, которые указывают на присутствие странного аттрактора (характеризуются отображениями Пуанкаре и фрактальными размерностями).
4. Переходные или перемежаемые хаотические движения; непериодические всплески нерегулярного движения (перемежаемость) или первоначально неупорядоченное движение, которое приводит к регулярному движению (методы экспериментального исследования включают измерение средней длительности хаотических всплесков или переходных режимов в зависимости от значения какого-либо параметра).
5. По мере изменения параметров динамической системы могут меняться число точек равновесия и их устойчивость. Такие изменения нелинейных систем, связанные с изменением параметров системы, являются предметом теории бифуркаций. Те значения параметров, при которых изменяются качественные или топологические свойства движения, называются критическими, или бифуркационными, значениями.

На рис. 2 в фазовой плоскости представлен график зависимости выходного сигнала (по оси  $Y$ ) от входного сигнала (по оси  $X$ ) на примере  $\Sigma\Delta$ -АЦП 3-го порядка при значении сигнала на входе системы  $X = 0,5$ . Замкнутая траектория на рис. 2 свидетельствует о наличии в системе периодического процесса.

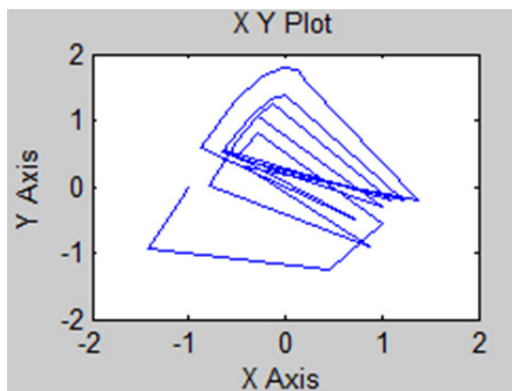


Рис. 2. График зависимости выходного сигнала от входного сигнала в  $\Sigma\Delta$ -АЦП 3-го порядка при  $X = 0,5$

Результаты моделирования показали, что при отклонении значения сигнала на входе системы  $X$  от  $X = 0,5$  на величину, большую  $10^{-9}$ , наблюдается постепенный переход от периодических к хаотическим колебаниям. На рис. 3 представлен график зависимости выходного сигнала от входного сигнала для входной величины  $X > 0,5 + 10^{-9}$ .

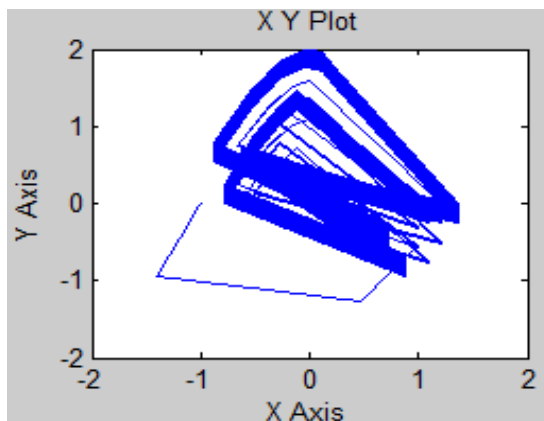


Рис. 3. График зависимости выходного сигнала от входного сигнала в  $\Sigma\Delta$ -АЦП 3-го порядка при  $X > 0,5 + 10^{-9}$

Наличие незамкнутой траектории на рис. 3 свидетельствует о наличии в системе хаотического процесса.

### Выводы

Трудности проектирования высокоточных  $\Sigma\Delta$ -АЦП в ИИС на этапе разработки инженерных методик и рекомендаций связаны с большим многообразием вариантов их построения как на уровне структурно-алгоритмических решений, так и в части использования свойств высокоточных  $\Sigma\Delta$ -АЦП в ИИС.

Также при проектировании нужно учитывать, что на уровне описания  $\Sigma\Delta$ -АЦП как нелинейных непрерывно-дискретных систем для их математического моделирования необходимо использовать опыт проектирования ПИ из смежных областей путем использования метода подобия моделей, структур, алгоритмов управления и обработки информации.

### Список литературы

1. Sigma-Delta (S-D) A/D Converters // New Product Application – 1999, winter edition- Analog Devices. – 1998. – P. 113–143.
2. Sigma – Delta ADCs and DACs // Application Reference Manual – Analog Devices. – 1993. – P. 3–18.
3. Синтезаторы частот / Б. И. Шахтарин [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 128 с.

4. Швец, В. Архитектура сигма-дельта АЦП и ЦАП / В. Швец, Ю. Нищирет // Chip News. – 1998. – № 2. – С. 211.
5. Gary, Ushaw. Sigma Delta Modulation of Chaotic Signal / Ushaw Gary. – Edinburg, 1998.
6. Чувькин, Б. В.  $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : моногр. / Б. В. Чувькин, В. Н. Ашанин, Э. К. Шахов. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2009. – 188 с.
7. Мун, Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М. : Мир, 1990.

**Чувькин Борис Викторович**

доктор технических наук, профессор  
кафедры информационно-вычислительных систем,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: chuvykin\_bv@mail.ru

**Chuvykin Boris Viktorovich**

doctor of technical sciences, professor  
of sub-department of information computer systems,  
Penza State University

**Долгова Ирина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры информационно-вычислительных систем,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: Dolgova\_IA@mail.ru

**Dolgova Irina Anatol'evna**

candidate of technical sciences, associate professor  
of sub-department of information computer systems,  
Penza State University

**Сидорова Ирина Александровна**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: irina-penza@mail.ru

**Sidorova Irina Aleksandrovna**

graduate student,  
Penza State University

УДК 681.518.3

**Чувькин, Б. В.**

**Вопросы проектирования высокоточных сигма-дельта АЦП в составе информационно-измерительных систем** / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 39–44.