

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП ДЛЯ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Россия, г. Пенза, Пензенский государственный технологический университет

At present, the domestic industry lags behind in the production of analog-to-digital converters, in terms of the range of manufactured products and the range of available conversion parameters, as well as the characteristics of the devices themselves. It is shown that sigma-delta analog-to-digital converters with first-order modulators can be considered the most promising from the point of view of the domestic industry. The paper presents the results of simulation in the Matlab $\Sigma\Delta$ -ADC environment, demonstrating the characteristics of a structure based on a first-order modulator according to the criterion of the exchange of resolution for speed.

Наиболее перспективными с точки зрения импортозамещения для отечественной промышленности можно считать сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи с модуляторами первого порядка. Порядок интегрирующего модулятора определяется числом интегрирующих звеньев в его составе. Увеличение количества интеграторов повышает фильтрующие свойства модулятора по отношению к внешним широкополосным шумам.

На начало этого года в продукции ведущих разработчиков микросхем электронных компонентов – Analog Devices, Texas Instruments и Maxim Integrated представлено большое разнообразие аналого-цифровых преобразователей. Компанией Analog Devices производится всего 673 микросхем АЦП из которых сигма-дельта АЦП – 173 компонента. Texas Instruments обозначила всего 573 действующих микросхем, из которых сигма-дельта АЦП 141 компонент, при этом прецизионных АЦП выпускается 241 микросхема от общего числа, из них 127 сигма-дельта, что составляет 50%. Также фирма Maxim Integrated производит всего 424 микросхемы АЦП, из которых сигма-дельта АЦП составляют 39 единиц.

Для сравнения приведем информацию по отечественным разработчикам: ЗАО ПКК «Миландр» выпускает две микросхемы АЦП: 5101НВ015 с разрядностью 14 бит и 1316ПП1У с разрядностью 18 бит [1]. ОАО НПО «Физика» выпускает пять микросхем: 1583НВ025 и 1583УВ025А с разрядностью 12 бит, 1583НВ015 (1586ПВ1У) 12 бит, 1586ПВ2У с разрядностью 14 бит и Ф025, Ф029, Ф029.1 с разрядностью 16 бит [2]. Дизайн-центр «Союз» выпускает четыре микросхемы: 5400ТР015005 и 5112НВ035 с разрядностью 14 бит и 5400ТР045А001, и 5400ТР045А014 с разрядностью в 12 бит [3]. АО ОНИИП выпускают 16-разрядный АЦП [4]. АО НИИЭТ выпускают также одну микросхему 1273ПВ19Т с разрядностью в 16 бит [5].

По приведенным выше данным, можно сделать вывод что сигма-дельта АЦП занимают существенную долю прецизионных преобразователей выпускаемыми зарубежными фирмами. Таким образом, очевидна необходимость увеличения номенклатуры выпускаемых устройств измерительных АЦП для отечественной промышленности. Кроме того, с 2019 года фирма Texas Instruments прекратила поставки своих радиоэлектронных компонентов в нашу страну.

Все указанные зарубежные микросхемы сигма-дельта АЦП строятся на основе сигма-дельта модуляторов второго и более высоких порядков. Отметим также что в последние годы прослеживается тенденция увеличения количества измерительных АЦП имеющих SAR архитектуру. Данные устройства начинают активно конкурировать

и даже вытеснять сигма-дельта преобразователи в сегменте прецизионных устройств (порядка 18 и более разрядов). Это связано с тем что при достижении аналогичного сигма-дельта АЦП прецизионного разрешения SAR-АЦП имеют существенно большее быстродействие.

Однако микросхемы данных преобразователей характеризуются сложной схемотехнической структурой аналоговой части, и высокие метрологические характеристики современных моделей достигаются за счет совершенствования технологических процессов производства.

Сигма-дельта модулятор первого порядка состоит из одного интегрирующего звена на операционном усилителе, одного компаратора, одного одноразрядного источника опорного сигнала, представляющего собой простой коммутатор, положительного и отрицательного опорных напряжений. Входной сигнал на модулятор подается через нормирующий усилитель, в простейшем случае, выполненный по схеме повторителя на ОУ. Таким образом, при производстве, не требуется обеспечивать близость характеристик операционных усилителей в нескольких интегрирующих звеньях, единство значений постоянных времени интегрирования, коэффициентов передачи сигналов и так далее. При этом такая структура обладает наилучшей линейностью и минимальным энергопотреблением. Поэтому, как было отмечено выше, модуляторы первого порядка являются весьма перспективными в рамках вопроса импортозамещения в области отечественных измерительных устройств для промышленности.

Главным недостатком схемы первого порядка является очень низкая эффективность обменной функции «разрешение – быстродействие». При оценке эффективности сигма-дельта АЦП принято, что сетка разрешенных уровней квантования и погрешность квантования зависят от входной величины аналогичного АЦП мгновенных значений [5-7]. При замене реальной нелинейной модели квантователя линейной и обеспечении статической независимости значения шума квантования от входного сигнала возникает процесс, получивший название «шейпинг шума квантования» – основная доля мощности шума выносится за пределы рабочей полосы [6-7]. Этим объясняют достижение превосходных характеристик сигма-дельта АЦП.

Полученная аналитически зависимость мощности шума квантования в однобитном сигма-дельта АЦП для постоянного входного воздействия [7,9-12] имеет неравномерную структуру и ярко выраженные пики, что указывает на появление в спектре шума квантования периодической (не случайной) составляющей. Следовательно, отношение сигнал/шум для реального сигма-дельта АЦП будет меньше, чем для линейной модели.

Кроме того, в ряде работ указывается, что особенность сигма-дельта АЦП состоит в наличии «мертвых зон» в пределах диапазона преобразуемых значений входной величины, расположение и протяженность которых соответствует позиции и ширине пиков в отмеченной зависимости мощности шума квантования. Указывается также, что для работы сигма-дельта АЦП характерно наличие так называемых «тоновых шумов» [5, стр. 293]: при неизменном входном сигнале в серии последовательно полученных выходных кодов могут появляться комбинации, отличные от ожидаемых.

Имитационная Simulink-модель сигма-дельта АЦП с однобитным модулятором первого порядка представлена на рисунке 1.

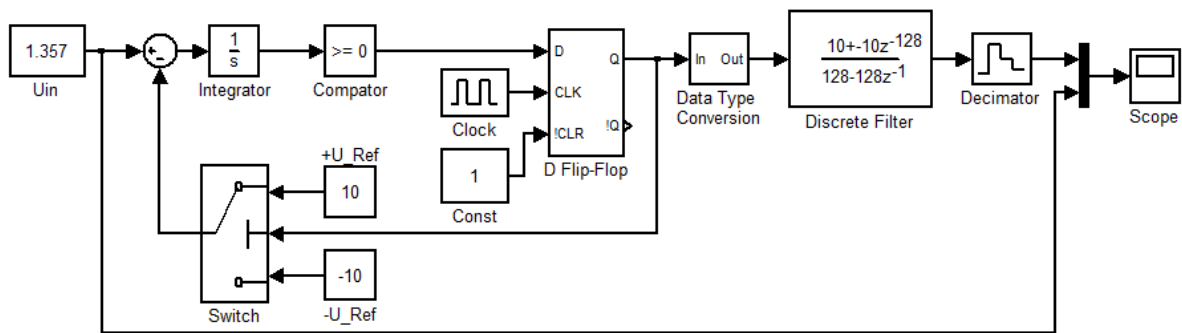


Рисунок 1 – Модель сигма-дельта АЦП первого порядка

В модели опорное напряжение $U_0 = 10$ В и длительность общего цикла преобразования $T_{\Pi} = 128T_0$, где $T_0 = 1/f_0$.

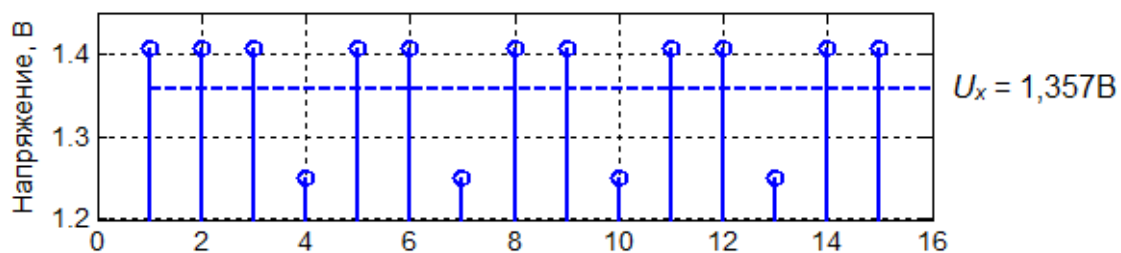


Рисунок 2 – Результаты моделирования сигма-дельта АЦП первого порядка

Из рисунка 2 видно, что для входного сигнала $U_x = 1,357$ В, действительно имеет место изменение результата преобразования. На рисунке 2 это 4, 7, 10 и 13-й результаты, на изменение значения U_x от 1,3545 до 1,358 В преобразователь в пределах 16-ти отсчетов не реагирует, т.е., существует «мертвая зона» 0,0035 В.

Учитывая, что работа модели рисунок 1 жестко синхронизирована с частотой $f_0 = 1/T$ и в ней отсутствуют источники случайного сигнала, можно считать наличие и изменение структуры «тоновых шумов» необходимым условием формирования процесса накопления информации о среднем значении входного сигнала.

Для оценки и иллюстрации данного процесса представим значения результатов преобразования постоянного входного напряжения $U_x = 1,33$ В, вычисленные для интервалов преобразования длительностью $T_{\Pi} = 100T_0$; $T_{\Pi} = 500T_0$; $T_{\Pi} = 1000T_0$; $T_{\Pi} = 2000T_0$. Моделирование проводилось в непрерывном (циклическом) режиме, следовательно, результаты вычислялись в примыкающих интервалах преобразования. Значение результатов и их относительная погрешность представлены в таблице 1. Во втором столбце таблицы одинаковые значения для номеров интервалов преобразования указанных в первом столбце объединены в одну ячейку.

Таблица 1 – Результаты преобразования входного напряжения $U_x = 1,33 \text{ В}$, $U_0 = 10 \text{ В}$

№ интервала, (100T ₀)	\bar{U}_x	№ интервала, (500T ₀)	\bar{U}_x	№ интервала, (1000T ₀)	\bar{U}_x	№ интервала, (2000T ₀)	\bar{U}_x								
1	1,4	1	1,32 (0,75%)	1	1,32 (0,75%)	1	1,33 (0%)								
2	(5,26 %)														
3	1,2 (9,7 %)														
4	1,4														
5	(5,26 %)														
6		2	1,32 (0,75%)												
7															
8															
9															
10	1,4 (5,26%)														
11	1,2							3	1,36 (2,25%)	2	1,34 (0,75%)				
12	(9,7 %)														
13															
14															
15															
16	4	1,32 (0,75%)													
17															
18								1,4 (5,26 %)							
19								1,2							
20								(9,7 %)							

Выполним декомпозицию выходных кодов исследуемой модели сигма-дельта модулятора с помощью разложения на основе функции Хаара, представленного в работе [13]. В таблице 2 представлены значения результатов преобразования, вычисленные на интервалах различной длительности, найденных с помощью декомпозиции. В первом столбце таблицы указаны номера тактов синхронизации T_0 работы модулятора, соответствующие концу каждого интервала преобразования, начало которого соответствует первому такту работы модулятора.

Таблица 2 – Результаты преобразования входного напряжения $U_x = 1,33 \text{ В}$, $U_0 = 10 \text{ В}$

№ такта преобразования	Результат \bar{U}_x	Относительная погрешность ΔU_x , %
90	1,333333	0,250626
203	1,330049	0,003703
293	1,331058	0,079550
406	1,330049	0,003703
496	1,330645	0,048508
609	1,330049	0,003703
699	1,330472	0,035496
812	1,330049	0,003703
902	1,330376	0,028341
1015	1,330049	0,003703
1098	1,329690	0,023282
1188	1,329966	0,002531
1301	1,329746	0,019071
1391	1,329978	0,001621
1504	1,329787	0,015997
1594	1,329987	0,000943
1707	1,329818	0,013654
1804	1,329994	0,000418
1903	1,329479	0,039115
2000	1,330000	0,000000

Из представленных данных видно, что идеальная модель сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя первого порядка, а, следовательно, и сам способ преобразования потенциально обеспечивают высокую эффективность обменной функции «разрешение – быстродействие». В реальном устройстве, характеризующемся шумами элементной базы и внешними воздействиями приведенные результаты очевидно будут скорректированы в худшую сторону. Таким образом, целью исследований в рамках реализации научной программы импортозамещения в области устройств АЦП можно считать поиск путей достижения теоретической разрешающей способности (обеспечиваемой способом преобразования) в устройствах сигма-дельта АЦП с модуляторами первого порядка, выполненных на конкретной элементной базе отечественного производства.

1. ЗАО «ПКК Минандр». Режим доступа: <https://www.milandr.ru/>, свободный (дата обращения 01.04.21). – Заголовок с экрана.
2. ОАО НПО «Физика». Режим доступа: <http://npofizika.ru/>, свободный (дата обращения 01.04.21). – Заголовок с экрана.
3. АО «Дизайн Центр Союз». Режим доступа: <https://dcsoyuz.ru/>, свободный (дата обращения 01.04.21). – Заголовок с экрана.
4. Акционерное общество «Омский научно- исследовательский институт приборостроения». Режим доступа: <http://www.oniir.ru/>, свободный (дата обращения 01.04.21). – Заголовок с экрана.
5. АО НИИЭТ. Режим доступа: <https://niiet.ru/niietresident/>, свободный (дата обращения 01.04.21). – Заголовок с экрана.

6. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с. [Kester W. Analog to digital conversion. – Moscow: Tekhnospera, 2007. – 1016 p. (In Russian)]
7. Шахов Э. К. $\Sigma\Delta$ -АЦП: Классификация и математические модели // Датчики и системы. – 2006. – №12. – С. 69-77. [Shakhov E.K. $\Sigma\Delta$ -ADC: Classification and mathematical models // Sensor and systems. – 2006. – №12. – P. 69-77. (In Russian)]
8. Шахов Э. К., Михотин В.Д. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с. [Shakhov E.K., Mikhotin V.D. Integrating sweeping voltage transducers. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 144 p. (In Russian)]
9. Delta-sigma data converters: theory, design and simulation / Ed. By St. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes // IEEE Computer Society Press. – 1996. – 476 p.
10. Schreier R. An empirical study of high-order single-bit delta-sigma modulators // IEEE Trans. On circuit and systems – II: Analog and digital signal processing. – 1993. – Vol.40, №8. – P. 461 – 466.
11. Candy J. C., Benjamin O. J. The structure of quantization noise from sigma-delta modulation // IEEE Trans. Commun. – 1981. – Vol. COM-29. – P. 1316 – 1323.
12. Schreier R., Temes G. C. Understanding delta-sigma data converters. – New Jersey: IEEE Press, 2005. – 446 p.
13. Пискаев, К.Ю., Лобышева, К.П. Обработка выходных кодов однобитного сигма-дельта модулятора с помощью вейвлета Хаара // Современные информационные технологии. – Пенза.: ПензГТУ. – 2019. – №29. – С. 66-71
14. Николаев А.В., Пискаев К.Ю., Ляшенко А.В., Юрманова С.В. Элементы теории и инженерного расчета $\Sigma\Delta$ -преобразователей системы идентификации состояния изделий РКТ // Датчики и системы. – 2018. – №3. – С. 11-18