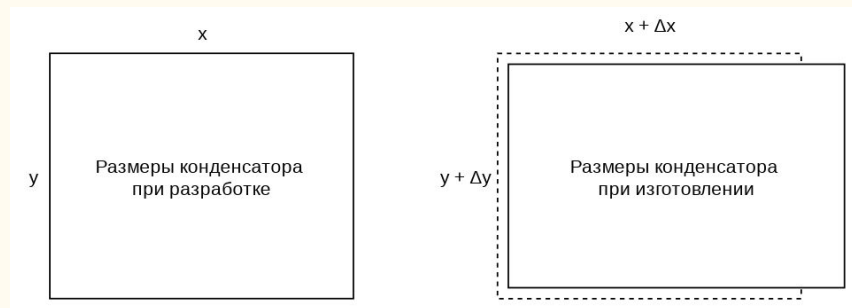


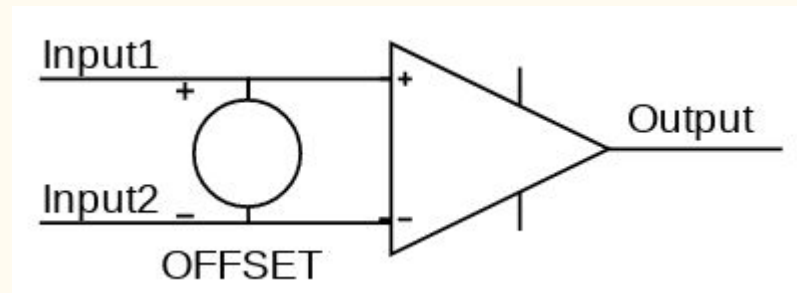
Разработка алгоритмов калибровки аналого-цифровых преобразователей с использованием математической модели на примере АЦП последовательного приближения

М.Н. Скрипниченко
НИУ МИЭТ, АО НПЦ “ЭЛВИС”

Проблемы при разработке АЦП



Разброс конденсаторов



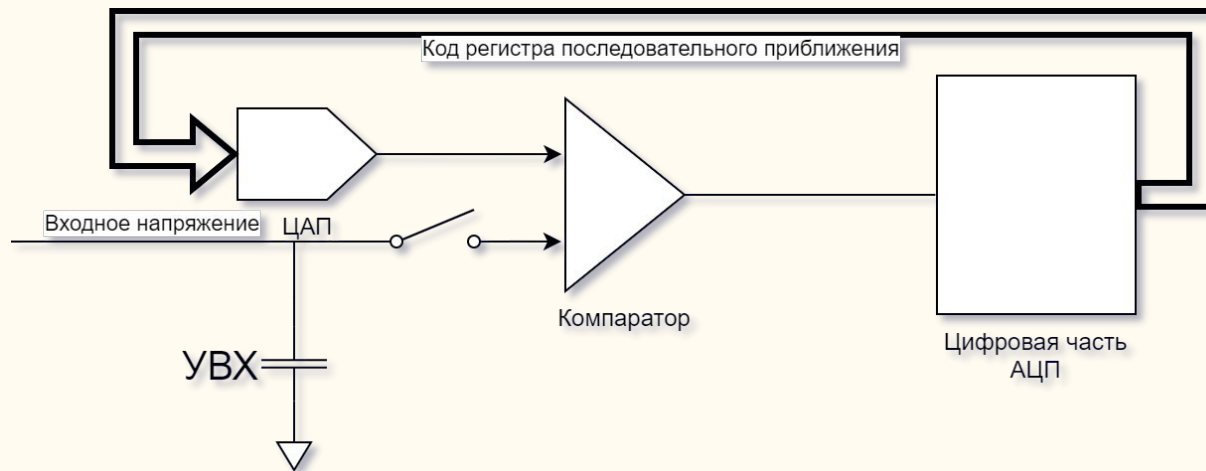
Оффсет дифференциальных пар

Алгоритмы калибровки АЦП

Виды калибровки:

- предварительная, учитывающая эффекты производства;
- фоновая, учитывающая эффекты эксплуатации -- повышение температуры, падение напряжения в определенных местах микросхемы;
- внешняя, учитывающая и эффекты эксплуатации, и эффекты производства.

АЦП последовательного приближения

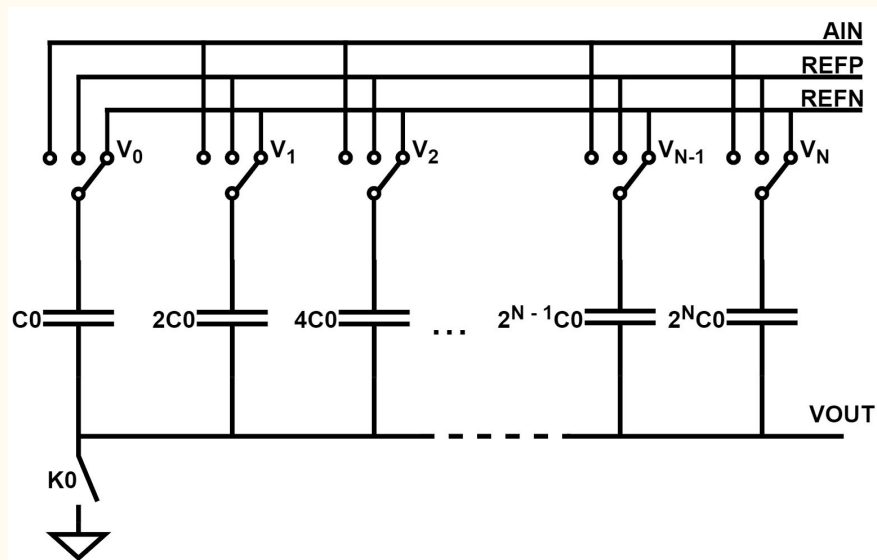


Ключевые компоненты:

- компаратор;
- ЦАП с матрицей конденсаторов;
- устройство выборки и хранения;
- цифровая часть, реализующая алгоритмы калибровок и оцифровки.

Структура матрицы конденсаторов.

Двоичная матрица.



Достоинства:

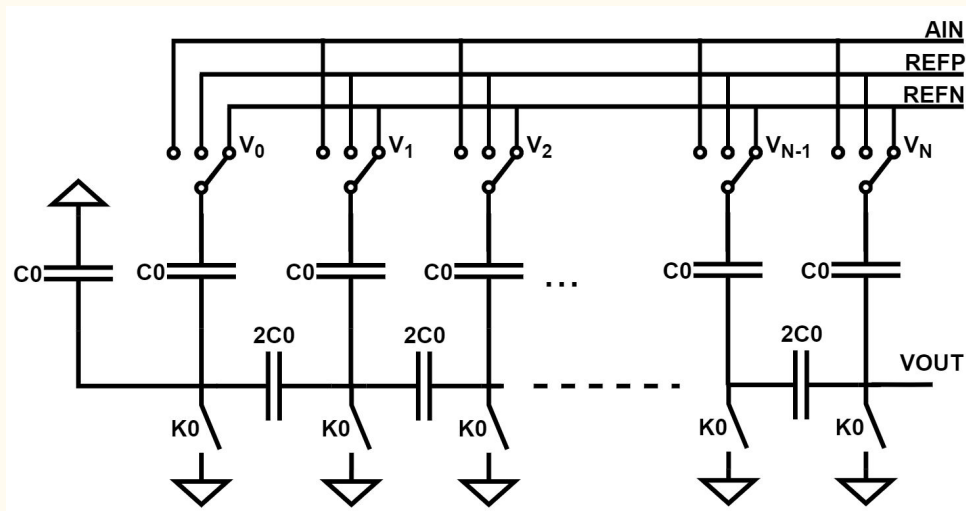
- простота реализации;
- единственный семплирующий ключ.

Недостатки:

- линейное увеличение размеров конденсаторов.

Структура матрицы конденсаторов.

Матрица C2C.



Достоинства:

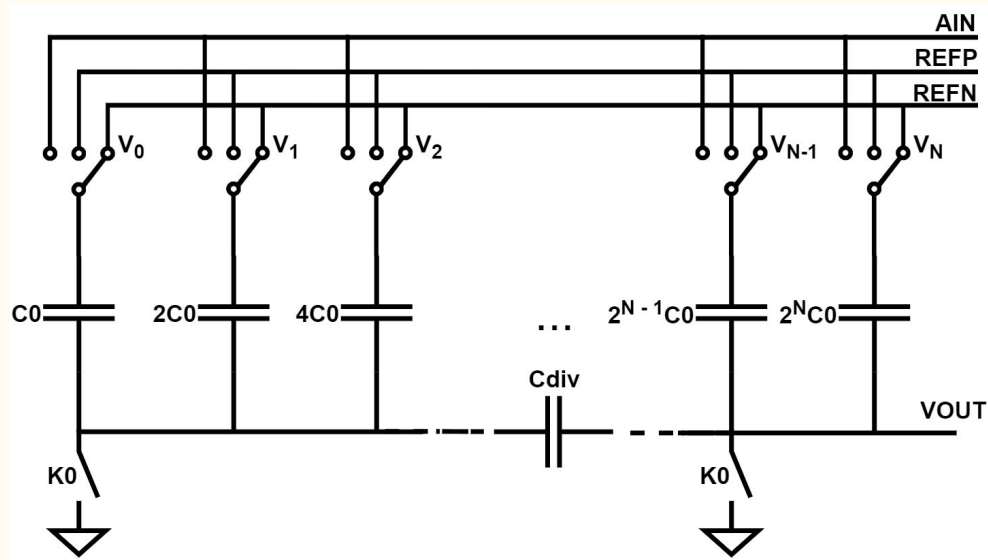
- конденсаторы всего двух номиналов.

Недостатки:

- количество семплирующих ключей совпадает с количеством конденсаторов, что увеличивает джиттер семплирования и ограничивает количество эффективных разрядов.

Структура матрицы конденсаторов.

Матрица с разделительными конденсаторами.



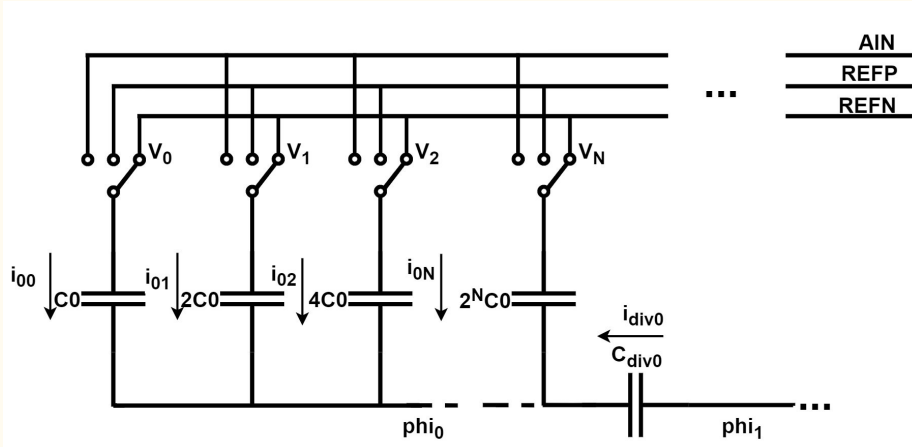
Достоинства:

- простота реализации конденсаторов в секции;
- количество семплирующих ключей совпадает с количеством конденсаторов.

Недостатки:

- необходимость расчета разделительного конденсатора для сохранения требуемого межразрядного отношения.

Составление математической модели



Токи через конденсаторы:

$$\sum_{k=0}^{N-1} i_{0k} + i_{div0} = 0$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} C_{0k} \frac{d(U_{0k}(t) - phi_o(t))}{dt} + C_{div0} \frac{d(phi_o(t) - phi_o(t))}{dt} = 0$$

Применение преобразования Лапласа:

$$\sum_{k=0}^{N-1} C_{0k} \frac{U_{0k}(p) - phi_o(p)}{p} + C_{div0} \frac{phi_o(p) - phi_o(p)}{p} = 0$$

Зависимость напряжения phi_0 от напряжения phi_1 и V_x и применение обратного преобразования Лапласа:

$$phi_o(t) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} C_{0k} * U_{0k}(t) + C_{div0} * phi_1(t)}{\sum_{k=0}^{N-1} C_{0k} + C_{div0}}$$

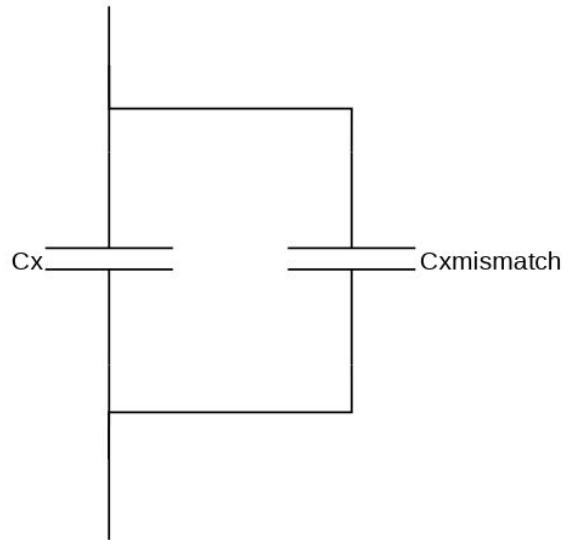
Составление математической модели

Зависимость напряжения на входе компаратора от значения на ключах V0 и V1 для двухсекционной матрицы по одному конденсатору в каждой:

$$V_{OUT} = \frac{V_0 * C_0 * C_{div0} + V_1 * C_1 * (C_0 + C_{div0})}{C_0 * C_1 + C_0 * C_{div0} + C_1 * C_{div0}}$$

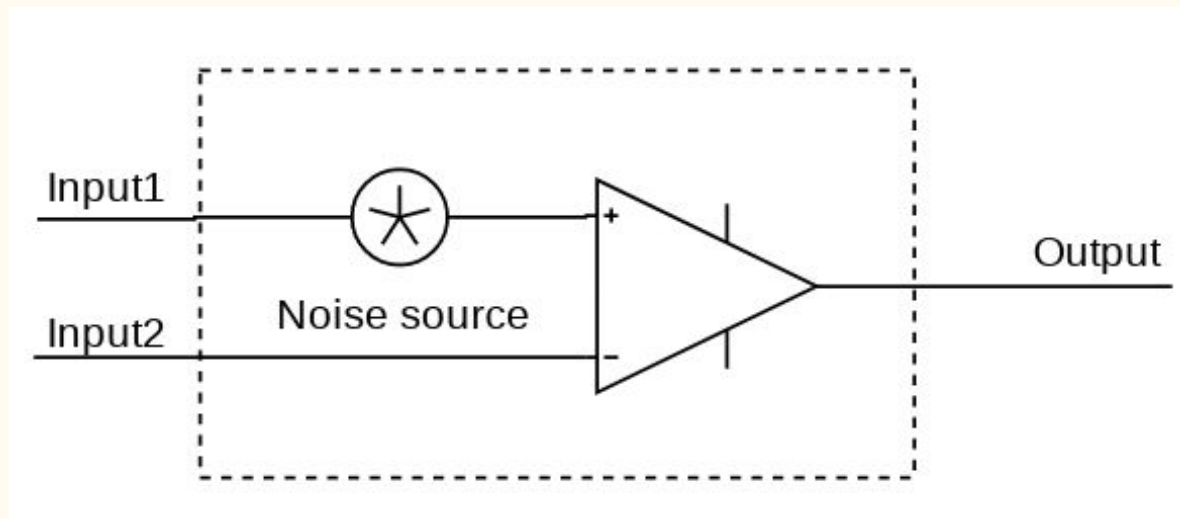
Модель разброса конденсаторов

Для моделирования разброса конденсаторов к емкости каждого конденсатора случайным образом добавлялось или вычиталось значение функции равномерного распределения от нуля до 0.01 веса младшего конденсатора в секции.



Модель физического шума

Аддитивный источник на одном из входов компаратора с нормальным распределением с СКО 32 мкВ и мат. ожиданием 0 В.



Алгоритм предварительной калибровки конденсаторов

Каждый конденсатор может быть представлен как линейная комбинация младших конденсаторов:

$$C_n = \sum_{i=0}^{n-1} C_i * K_{ni}$$

Для корректности разложения необходимо убедиться, что

$$\left| \Delta V_n - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta V_i * K_{ni} \right| < \Delta V_0$$

Алгоритм предварительной калибровки конденсаторов

Вводится понятие “вес конденсатора” -- безразмерная величина, отражающая его емкость. Отношение весов двух конденсаторов равно отношению емкостей конденсаторов с точностью до веса младшего конденсатора в разложении.

Расчет веса калибруемого конденсатора через веса младших конденсаторов:

$$W_n = \sum_{i=0}^{n-1} W_i * K_{ni}$$

Алгоритм предварительной калибровки конденсаторов

Необходимо пересчитать вес конденсаторов для корректировки корректного выходного кода:

$$Wfs_n = \frac{\sum_i^{n-1} W_i * K_{ni}}{\sum_l W_l}$$

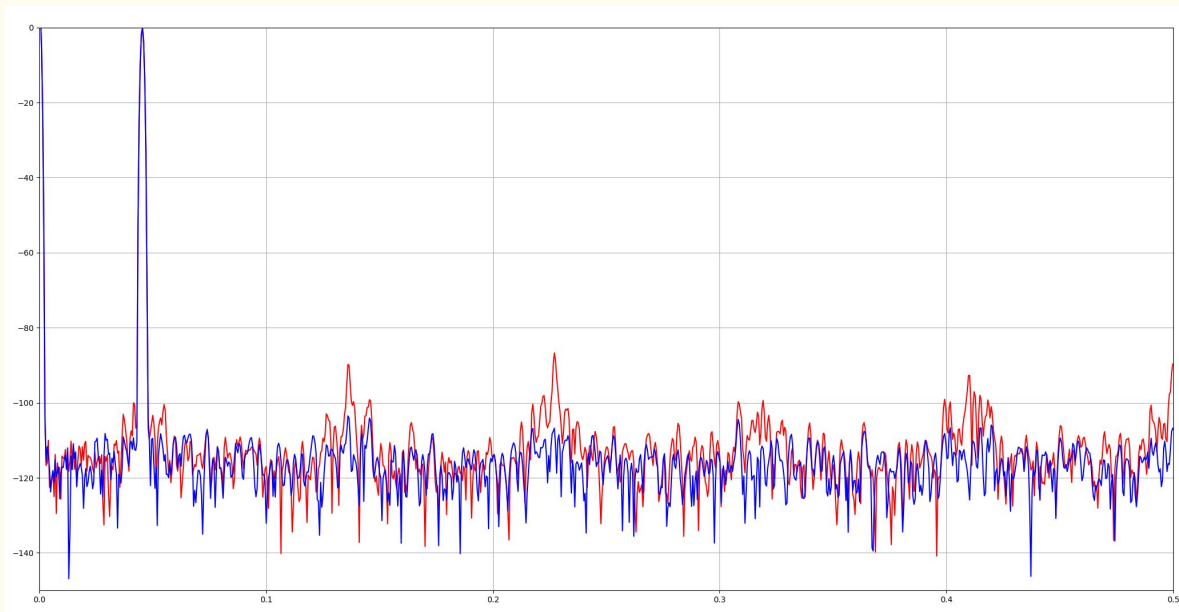
Расчет выходного кода в зависимости от кода на матрице:

$$Result = \sum_{i=0}^{n-1} Wfs_i * CODE_i$$

Результаты моделирования алгоритма

Параметры моделирования	Наличие предварительной калибровки	Отношение сигнала к шуму, дБ	Количество эффективных разрядов
Без разброса конденсаторов и шума	Да/Нет	113.54/113.57	18.56/18.57
Без разброса конденсаторов, с шумом	Да/Нет	89.3/89.9	14.55/14.56
С разбросом конденсаторов, без шума	Да/Нет	96.5/86.46	15.7/14.1
С разбросом конденсаторов и шумом	Да/Нет	89.7/82.7	14.6/13.4

Результаты моделирования алгоритма



Спектр с шумом и разбросом конденсаторов без калибровки (красный график) и с предварительной калибровкой (синий).

Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, увеличился на 16.8 дБ.

Выводы

Был предложен способ использования модели при разработке и отладке алгоритмов калибровки, ускоряющий данные процессы.

Алгоритм, учитывающий разброс конденсаторов, показал эффективность в условиях разброса конденсатора и шума на входе компаратора. Благодаря использованию алгоритма отношение сигнала к шуму возросло на 7.3 дБ, что эквивалентно 1.2 эффективных разрядов. Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, увеличился на 16.8 дБ.

Спасибо за внимание!