УДК 006.022

ПОЛУЛЯХ К.С., к.т.н., проф. НТУ «ХПИ»
МЕДВЕДЕВА Л.А., доц. НТУ «ХПИ»
ТОПОЛОВ И.И., ст. преп. НТУ «ХПИ»

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ПАРАЛЕЛЬНО–ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ЦИФРОВИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Робота присвячена вивченню можливостей покращення експлуатаційних характеристик асинхронних паралельно-послідовних АЦП підвищеної швидкодії. Розглянуті методи розрахунку параметрів схем на базі використання позиційних систем числення. Запропонована методика вибору оптимальних варіантів структур паралельно послідовних вольтметрів.

Work is devoted the study of possibilities of improvement of operating descriptions of asynchronous paralell-seriall ADC of enhanceable fast-acting. The methods of calculation of parameters of charts are considered on the base of the use of position scales of notation. The method of choice of optimum variants of structures is offered parallell successive voltmeters.

Широкое использование паралельно-последовательных цифровых измерительных приборов (ЦИП) ограничивается сложностью схем, которая резко возрастает с увеличением разрядности АЦП, что приводит к увеличению стоимости прибора. Поэтому представляет интерес исследование возможности выбора оптимальных параметров схем, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики приборов в сочетании с использованием новых разработок интегральных микросхем. Данная работа посвящена исследованию асинхронных параллельно-последовательных АЦП [1].

Результат измерения напряжения U_x цифровыми приборами определяется уравнением:

$$U_x = \Delta U \cdot N_x \qquad (1)$$

где ΔU – ступень (шаг) квантования;

N_x – число ступеней (шагов) квантования.

Процесс измерения заключается в определении величины N_x. В приборах параллельно-последовательного типа определение N_x происходит путем последовательного сравнения U_x в соответствующих тактах со ступенями уравновешивания равными ΔU; ΔUP; $\Delta UP^2 \ldots . \Delta UP^{m-1}$, где P – натуральное целое число больше единицы. В каждом такте определяется количество ступеней уравновешивания n_1; n_2; ... n_m.

Результат измерения напряжения в каждом такте определяется как произведение количества n_i ступеней уравновешивающего напряжения на величину ступени.

Так, например, при трех тактах измерения $m = 3$ используются уравновешивающие ступени $\Delta U;\ \Delta UP;\ \Delta UP^2$.

В соответствующих тактах, в процессе измерения определяются количества уравновешивающих ступеней n_3; n_2; n_1. При этих условиях величину измеряемого напряжения U_x можно представить уравнением:

$$U_x = n_1 \Delta U \cdot P^2 + n_2 \Delta U \cdot P + n_3 \Delta U. \qquad (2)$$

Для определения количества ступеней квантования N_x разделим уравнение (2) на ΔU. С учетом (1) получим:

$$N_x = U_x / \Delta U = n_1 P^2 + n_2 P + n_3. \qquad (3)$$

Составляющие уравнения, относящиеся к каждому такту, называются разрядами, а веса разрядов в уравнении (2) являются ступенями уравновешивания: $\Delta U\ P^2;\ \Delta U\ P;\ \ \Delta U$, величины, которых остаются постоянными.

Алгоритм определения значений n_1, n_2, n_3 поясним с помощью аналогии показанной на рисунке 1. Пусть требуется измерить отрезок содержащий N_x ступеней квантования. В качестве примера примем значение P равное $P = 4$, следовательно, веса разрядов (тактов) будут: $P^2 = 16$, $P = 4$, $P^0 = 1$. В первом такте выполняется измерение с помощью линейки с делениями равными весу первого разряда $P^2 = 16$.

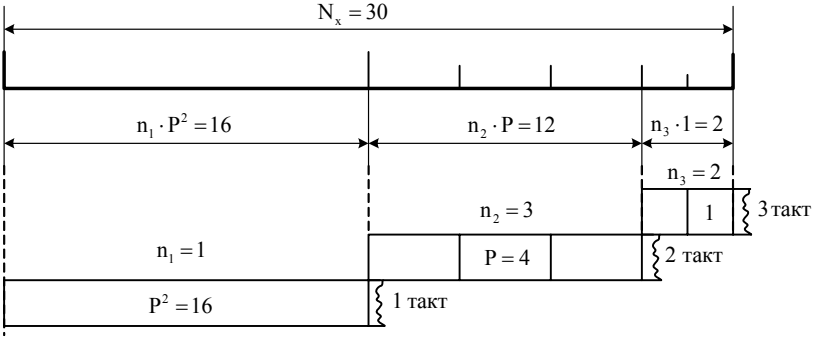


Рисунок 1 – Алгоритм определения колличества ступеней n_i

В результате получаем число ступеней $n_1 = 1$. Оставшаяся часть измеряется линейкой с делениями равными весу второго разряда $P = 4$, число ступеней будет $n_2 = 3$ (второй такт). В третьем такте для измерения оставшейся длины отрезка используется линейка с делениями равным 1, получим $n_3 = 2$. На основании полученных измерений, используя уравнение (3), получим $N_x = 30$.

Определим максимально возможное число ступеней уравновешивания n_{max} для различных каскадов в уравнении (3). Пусть для младшего разряда $n_3 = P\text{-}1$, а в следующем старшем разряде это число пусть

будет равно $n_2 = 0$. Если число ступеней увеличится на единицу, общее число ступеней будет равно P, что соответствует ступени следующего старшего разряда. Поэтому в старшем разряде получим $n_2 = 1$, а в младшем каскаде $n_3 = 0$. Такой же вывод можно получить для всех каскадов, следовательно, во всех каскадах максимальное число ступеней не превысит величину равную *(P*-1*)*, т.е.

$$n_1 = n_2 \ldots n_{max} = P - 1. \quad (4)$$

Уравнение (3) по своей структуре соответствует представлению числа N_x с помощью некоторой позиционной системы счисления в которой при переходе к следующему старшему разряду вес разряда увеличивается в *P* раз, начиная от единицы для младшего разряда.

Позиционная система счисления характеризуется основным (базисным) числом *P*, которое представляется натуральным целым числом, равным *P* = 2, 3, 4 … и т.д. Значение *P* определяет вид системы счисления: двоичная, троичная, четырехричная и т.д.

Представим уравнение (3) в общем виде, выразив составляющие уравнения через количество разрядов *m*. Уравнение (3) получено для *m* =3, при этом вес старшего разряда равен P^2. Следовательно, старший разряд в общем виде примет вид: $n_1 \cdot P^{m-1}$. Для каждого следующего младшего разряда степень *P* уменьшится на единицу и в последнем разряде доходит до нулевого значения, последний и предпоследний разряды имеют вид соответственно: $n_m \cdot P^0 = n_m$; $n_{m-1} \cdot P$. Представим уравнение (3) в общем виде:

$$N_x = n_1 \cdot P^{m-1} \ldots n_{m-1} \cdot P + n_m. \quad (5)$$

Определим максимальное число ступеней квантования N_{max} из уравнения (5), подставив во все разряды значение $n_{max} = (P\text{-}1)$ согласно уравнению (4):

$$N_{max} = (P-1) \cdot \left(P^{m-1} + \ldots P + 1\right).$$

Второй множитель – это геометрическая прогрессия, сумма членов которой выражается уравнением:

$$P^{m-1} \ldots P + 1 = \frac{P^{m-1} - 1}{P - 1}.$$

Из последних двух уравнений получим:

$$N_{max} = P^m - 1. \quad (6)$$

Назовем номинальным значение $N_{хн}$. Количество ступеней квантования равное $N_{хн} = N_{max} + 1$. Из (6) найдем:

$$N_{хн} = P^m. \quad (7)$$

В качестве примера приведем значения N_{max} и $N_{хн}$ для числа разрядов m=3, при использовании десятичной системы счисления (P=10):

$$N_{max} = P^m - 1 = 999;$$

$$N_{хн} = N_{max} + 1 = P^m = 1000.$$

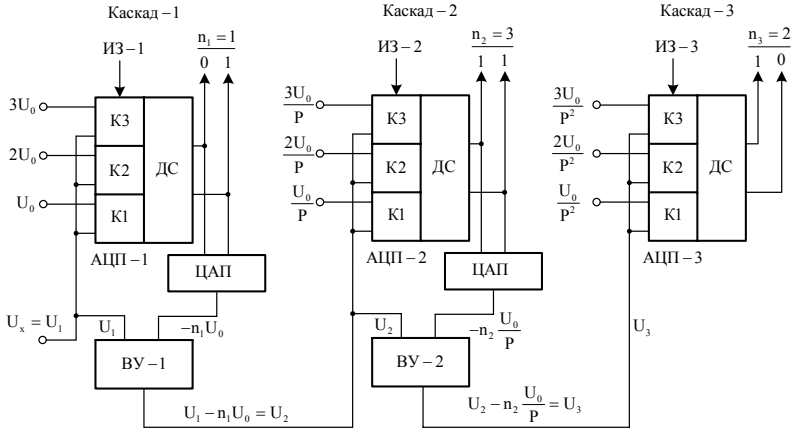
Согласно алгоритму измерения, представленному на рис. 1, процесс уравновешивания начинается со старшего разряда. Поэтому для дальнейших расчетов необходимо определить величину ступени уравновешивания U_0 старшего разряда. В уравнении (2) ступень $U_0 = \Delta U \ P^2$, а в общем виде, использовав уравнение (7), можно получить: $U_0 = \Delta U \cdot P^{m-1}$.

Подставив значение $\Delta U = U_{хн} / N_{хн} = U_{хн} / P^m$, найденное из (7), определим:

$$U_0 = U_{хн} / P; \qquad (8)$$

где $U_{хн}$ – номинальное значение измеряемого напряжения.

Реализация алгоритма уравновешивания, показанная на рисунке 1, в электронном виде представлена на рис. 2.



ИЗ -1, -2, -3 – импульс тактового генератора, запускающий АЦП;
К1, К2, К3 – компараторы параллельного АЦП;
ДС – дешифраторы единичного кода;
ВУ -1, -2 – вычитывающие устройства.

Рисунок 2 – Схемная реализация алгоритма уравновешивания

В каждом разряде используется параллельный АЦП. Количество сравнивающих устройств (компараторов $K1$, $K2$…) в каждом разряде равно $n_{max}=P-1$, так как количество ступеней уравновешивания не превышает это число согласно (4). В первом разряде определяется

количество ступеней уравновешивания n_1 величиной U_0, в каждом последующем каскаде величина U_0 уменьшается в P раз, а число ступеней уравновешивания в последующих каскадах равно $n_2, n_3, \ldots n_m$.

В качестве примера рассмотрим процесс уравновешивания, используя четырехричную позиционную систему счисления, положив $P = 4$ и количество разрядов (каскадов) равное $m = 3$.

Зададим измеряемое напряжение $U_x = U_1$, содержащее число шагов квантования $N_x = 30$, а шаг квантования ΔU для простоты расчетов будем считать равным единице, тогда получим, используя (8):

$$U_1 = N_x \cdot \Delta U = 30;$$

$$U_{xн} = N_{xн} \cdot \Delta U = 4^3 = 64;$$

$$U_0 = \frac{U_{xн}}{P} = \frac{U_{xн} \cdot \Delta U}{P} = 16.$$

где U_0 – ступень уравновешивания первого разряда, выраженная в шагах квантования.

В первом разряде с помощью параллельного АЦП – 1, содержащего компаратора $K1$, $K2$, $K3$ ($n_{max} = P\text{-}1 = 3$) определяется код $n_1 = 1$. Затем с помощью ЦАП выполняется преобразование n_1U_0 и результат вычитается из измеряемого напряжения U_1. Полученная разность $U_1 - n_1U_0 = U_2$ поступает на вход АЦП – 2 следующего каскада, где с помощью уравновешивающих ступеней U_0 / P определяется значение $U_2 = 3$ и т.д.

Процесс измерения показан в таблице 1. Импульсы ИЗ -1, -2, -3 от тактового генератора с периодом T_0 последовательно запускают АЦП –1, –2, –3. Время измерения определяется уравнением:

$$t_{изм} = m \cdot T_0. \qquad (9)$$

Результат измерения N_x вычисляется из уравнения (3).

Таблица 1 – Данные процесса измерения

Номера тактов	Напряж. на вх. АЦП	Ступень уравновеш. АЦП	Код АЦП	Входное напряжение следующего каскада
1	$U_1 = 30$	$U_0 = 16$	$n_1 = 1$	$U_2 = U_1 - n_1U_0 = 30\text{-}1\cdot16\text{=}14$
2	$U_2 = 14$	$U_0 / P = 4$	$n_2 = 3$	$U_3 = U_2 - n_2 U_0/P = 14\text{-}3\cdot16/4 = 2$
3	$U_3 = 2$	$U_0 / P^2 = 1$	$n_3 = 2$	————

Как следует из (7) номинальное число ступеней (шагов) квантования $N_{xн}$ определяется парой целых чисел P и m, где m – число разрядов измерительной схемы, P – базисное число выбранной системы счисления. При проектировании параллельно-последовательных вольтметров возникает задача определения значений P и m при

заданном числе $N_{хн}$, величина которого определяется исходя из требуемой погрешности.

Как следует из (7) каждой паре параметров P и m (пара $P - m$) соответствует определенное номинальное число шагов квантования $N_{хн}$, причем для некоторых значений $N_{хн}$ возможно существование нескольких пар $P - m$, количество которых доходит до четырех, эти пары $P - m$ имеют обозначение А, В, С, Д.

Для упрощения расчетов в таблице 2 даны значения $N_{хн}$ для диапазона $10^3 - 10^5$ и соответствующие им пары $P - m$ в диапазоне р от 2 до 16.

Таблица 2 – Значения $N_{хн}$ для диапазона $10^3 - 10^5$

№	$N_{хн}$	A		B		C		Д		№	$N_{хн}$	A		B		C	
		p	*m*	*p*	*m*	*p*	*m*	*p*	*m*			*p*	*m*	*p*	*m*	*p*	*m*
1	1000	10	3							17	10000	10	4				
2	1024	2	10	4	5					18	14641	11	4				
3	1296	6	4							19	15625	5	6				
4	1331	11	3							20	16384	2	14	4	7		
5	1728	12	3							21	16807	7	5				
6	2048	2	11							22	19683	3	9				
7	2187	3	7							23	20736	12	4				
8	2197	13	3							24	28561	13	4				
9	2401	7	4							25	32768	2	15	8	5		
10	2744	14	3							26	38416	14	4				
11	3125	5	5							27	46656	6	6				
12	3375	3	8	15	3					28	50625	15	4				
13	4096	2	12	4	6	8	4	16	3	29	59049	3	10				
14	6561	9	4							30	65536	2	16	4	8	16	4
15	7776	6	5							31	78125	5	7				
16	8192	2	13							32	100000	10	5				

При выбраном из таблицы 2 значении $N_{хн}$ можно определить соответствующую ему пару $P–m$. Выбранные значения $N_{хн}$ и соответствующие пары $P–m$ будут отличаться своими данными от других вариантов. При увеличении числа m будет возрастать время измерения $t_{изм} = m\ T_0$ (9), но при том же значении $N_{хн}$ будет уменьшаться количество компараторов n_{max}, как следует из (7):

$$n_{max} = P - 1 = \sqrt[m]{N_{хн} - 1}$$

Отсюда следует, что при выборе схемы следует исходить из требований к проектируемому прибору. В одних случаях, возможно, потребуется высокое быстродействие (малое m), в других вариантах – простота схемы, т.е. малое количество компараторов n_{max}.

В некоторых случаях возникает необходимость нахождения оптимального варианта выбора параметров, например, получить

минимальное значение, как количества каскадов m, так и минимальное значение числа компараторов P-1.

Для облегчения выбора параметров и возможности сравнения вариантов используем коэффициент сравнительной оценки вариантов $K_{сов}$:

$$K_{сов} = \frac{1000}{m^2 n_{max}} = \frac{1000}{m^2 (P-1)}. \quad (10)$$

В этой формуле число 1000 – это масштабный коэффициент. Величина $K_{сов}$, рассчитанная по этой формуле, будет уменьшаться как при возрастании m ($t_{изм}$ пропорционально m), так и при увеличении числа сравнивающих устройств: $n_{max} \cdot m$. Будем считать, что выбранный вариант будет близок к оптимальному при максимальной величине коэффициента $K_{сов}$, когда величины m и $m\ n_{max}$ будут минимальными. Величина $m\ n_{max}$ – это суммарное количество компараторов во всех каскадах, если количество каскадов равно m.

Таблица 3 – Примеры расчета $K_{сов}$,

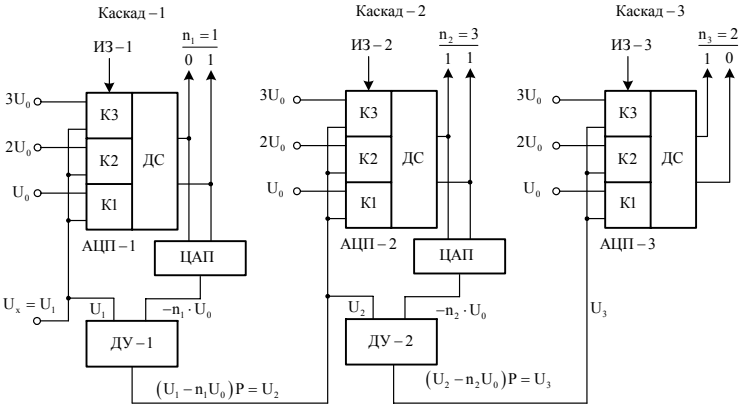
Пример 1					Пример 2			
$N_{хн}$	1024		1000		$N_{хн}$	2048	2187	2197
p	2	4	10		p	3	3	13
m	10	5	3		m	11	7	3
$K_{сов}$	10	13,33	12,34		$K_{сов}$	8,26	10,20	9,2
Пример 3					Пример 4			
$N_{хн}$	4096				$N_{хн}$	65536		
p	2	4	8	16	p	2	4	16
m	12	6	4	3	m	16	8	4
$K_{сов}$	6,94	9,25	8,32	7,4	$K_{сов}$	3,9	5,2	4,1

В табл. 3 даны примеры расчета $K_{сов}$, по максимальному значению которого выбран оптимальный вариант значения параметров P и m при близких или равных значениях $N_{хн}$. Принятые варианты $K_{сов}$ подчеркнуты.

Недостаток АЦП, построенного по схеме рисунка 2, состоит в отличии режимов работы каскадов, так как уменьшается входное напряжение каждого последующего каскада ($U_1 > U_2 > U_3 \ldots > U_m$). Это обстоятельство вынуждает уменьшать ступень уравновешивания последующего каскада в P раз: (U_0; U_0 / P; U_0 / P^2; … U_0 / P^{m-1}), что усложняет схему.

Поэтому используется другой алгоритм уравновешивания, который поясняется рисунком 3 и таблицей 4 [2].

Согласно этому алгоритму входное напряжение следующего каскада формируется с помощью дифференциального усилителя ДУ, на входы которого поступают сравниваемые напряжения, разность которых усиливается в P раз, как показано на рисунке 3 и в таблице 4. (усиление напряжения $U_2, U_3, \ldots U_m$).



ИЗ – 1, -2, -3 – импульс тактового генератора, запускающий АЦП;
К1, К2, К3 – компараторы параллельного АЦП;
ДС – дешифраторы единичного кода;
ДУ -1,-2 – дифференциальный усилитель.

Рисунок 3 – Схемная реализация алгоритма уравновешивания с применением ДУ

Таблица 4 – Данные для пояснения рис.3

Номера тактов	Напр. на вх. АЦП	Ступень уравновеш. АЦП	Код АЦП	Входное напряжение следующего каскада
1	U_1=30	U_0=16	n_1=1	$U_2 = (U_1 - n_1 U_0)P = (30\text{-}1\cdot16)4 = 56$
2	U_2=56	U_0=16	n_2=3	$U_3 = (U_2 - n_2 U_0)P = (56\text{-}3\cdot16)4 = 32$
3	U_3=32	U_0=16	n_3=2	————

Во всех каскадах уравновешивания ступени U_0 и коэффициенты усиления P дифференциальных усилителей одинаковы, следовательно схемы всех каскадов идентичны, что значительно укрощает схему прибора.

Полученные теоретические выводы справедливы для обеих схем, приведенных на рисунках 2 и 3.

Схемы рисунков 2, 3 в случае использования двоичной системы счисления называются АЦП конвейерного типа [1, 3].

Список литературы: 1. *В.М. Чинков*, Цифрові вимірювальні прилади, – Харків: НТУ «ХПІ», 2008, с. 507. **2.** *В.Ю. Кончаловский*, Цифровые измерительные устройства, –М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 304. **3.** *П.П. Орнатский,* Автоматические измерения и приборы. –Киев, «Вища школа», 1986, с. 504. **4.** *Б.И.Швецкий*, Электронные цифровые приборы. –Киев: «Техника», 1991, с.191.

Поступила в редколлегию 27.01.11