

Г. Г. МАТУШКИН  
(Новосибирск)

**ЗАВИСИМОСТЬ  
МАКСИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ТАКТОВ УРАВНОВЕШИВАНИЯ  
НЕРАВНОМЕРНО РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ  
И НЕРАВНОМЕРНО СЛЕДЯЩИХ АЦП  
ОТ ЧИСЛА ПОРОГОВЫХ УСТРОЙСТВ**

АЦП неравномерно развертывающего и неравномерно следящего уравнивания, в которых осуществляется параллельно-последовательное выполнение операций сравнения измеряемой величины с образцовыми, как правило, выполняются с числом пороговых устройств, равным числу разрядов [1, 2]. С другой стороны, пороговые устройства являются одними из наиболее ответственных узлов АЦП и во многом определяют их сложность и надежность. Поэтому влияние числа используемых пороговых устройств на максимальное число тактов уравнивания АЦП представляет несомненный интерес и является предметом рассмотрения настоящей статьи.

В частном случае двоичных неравномерно развертывающих АЦП с формированием компенсационной величины ступенями, равными сумме весовых значений разрядов, подобная зависимость была исследована в [3]. Естественно, что при данном числе пороговых устройств, значения их порогов срабатывания и значения ступеней компенсационной величины, которые они включают, могут выбираться различным образом. Однако в [4] было показано, что для данного числа уровней квантования шкалы существует оптимальный набор значений ступеней компенсационной величины, при котором максимальное число тактов уравнивания прибора приобретает наименьшее значение.

При этом отношение соседних значений ступеней этого оптимального набора должно быть равно

$$r = \sqrt[k]{q}, \quad (1)$$

где  $k$  — число пороговых устройств;  $q$  — число уровней квантования шкалы прибора.

Там же дано правило выбора оптимальных значений ступеней компенсационной величины при получении дробного  $r$ .

Естественно, что полученные оптимальные значения ступеней однозначно определяют номер двоичной ячейки счетчика-сумматора АЦП, на вход которой подаются тактовые импульсы с выхода порогового устройства, соответствующего данному значению ступени.

С другой стороны, оптимальные значения порогов срабатывания  $A_{\text{пор}_i}$ , как показано в [2, 5], однозначно связаны со значениями ступеней компенсационной величины  $\Delta_i A_k$ . Так, для неравномерно развертывающих АЦП оптимальное значение  $A_{\text{пор}_i} = \Delta_i A_k$ , а для неравномерно следящих

$$A_{\text{пор}_i} = \frac{\Delta_i A_k + \Delta_{i-1} A_k}{2}. \quad (2)$$

Поэтому для данного значения числа пороговых устройств  $k$  при данном числе разрядов АЦП  $N$  будем рассматривать только тот случай, который соответствует либо оптимальному набору значений ступеней компенсационной величины (если они равны весовым значениям разрядов), либо в случае практической невозможности его получения (например, когда значения ступеней равны суммам весовых значений разрядов) — наиболее близкому к нему.

При значениях ступеней компенсационной величины, равных весовым значениям разрядов, максимальное число тактов уравнивания неравномерно развертывающих АЦП, как показано в [4], можно легко получить из выражения

$$n_{\text{max}} = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{i+1} A_k}{\Delta_i A_k} - m, \quad (3)$$

где  $m=k$  — число значений ступеней компенсационной величины  $A_k$ ;  $\Delta_i A_k$  —  $i$ -е значение ступени компенсационной величины,  $\Delta_{m+1} A_k = q$ .

Путем аналогичных рассуждений может быть также получено выражение для максимального числа тактов уравнивания неравномерно следящих АЦП, которое будет иметь вид

$$n_{\text{max}} = \frac{\Delta_{m+1} A_k}{\Delta_m A_k} + \sum_{i=1}^{m-1} \left[ \frac{\Delta_{i+1} A_k + \Delta_i A_k}{2 \Delta_i A_k} \right] - \left[ \frac{m}{2} \right]. \quad (4)$$

Здесь квадратные скобки означают целую часть заключенного в них числа.

Однако получение аналитического выражения для определения максимального числа тактов уравнивания при данном числе пороговых устройств в случае, когда компенсационная величина формируется ступенями, значения которых равны суммам весовых значений разрядов, в общем случае весьма затруднительно, поскольку оно может иметь различный вид при различных  $N$  и  $k$ . Поэтому для получения зависимостей максимального числа тактов уравнивания от числа пороговых устройств сравнения при различных типах АЦП было проведено моделирование неравномерно развертывающих и неравномерно следящих АЦП на ЭЦВМ, ограничившись практически наиболее важными случаями двоичных и десятичных приборов. Полученные в результате моделирования зависимости для двоичных АЦП показаны на рис. 1, а — 4, а, причем для более четкого представления начальных данных при моделировании в табл. 1, относящейся к случаям двоичных неравномерно следящих АЦП с формированием компенсационной величины ступенями, равными сумме весовых значений разрядов, приведены также численные значения ступеней компенсационной величины и оптимальные значения порогов срабатывания соответствующих пороговых устройств для 8- и 10-разрядных АЦП.

Зависимости между максимальным числом тактов уравнивания

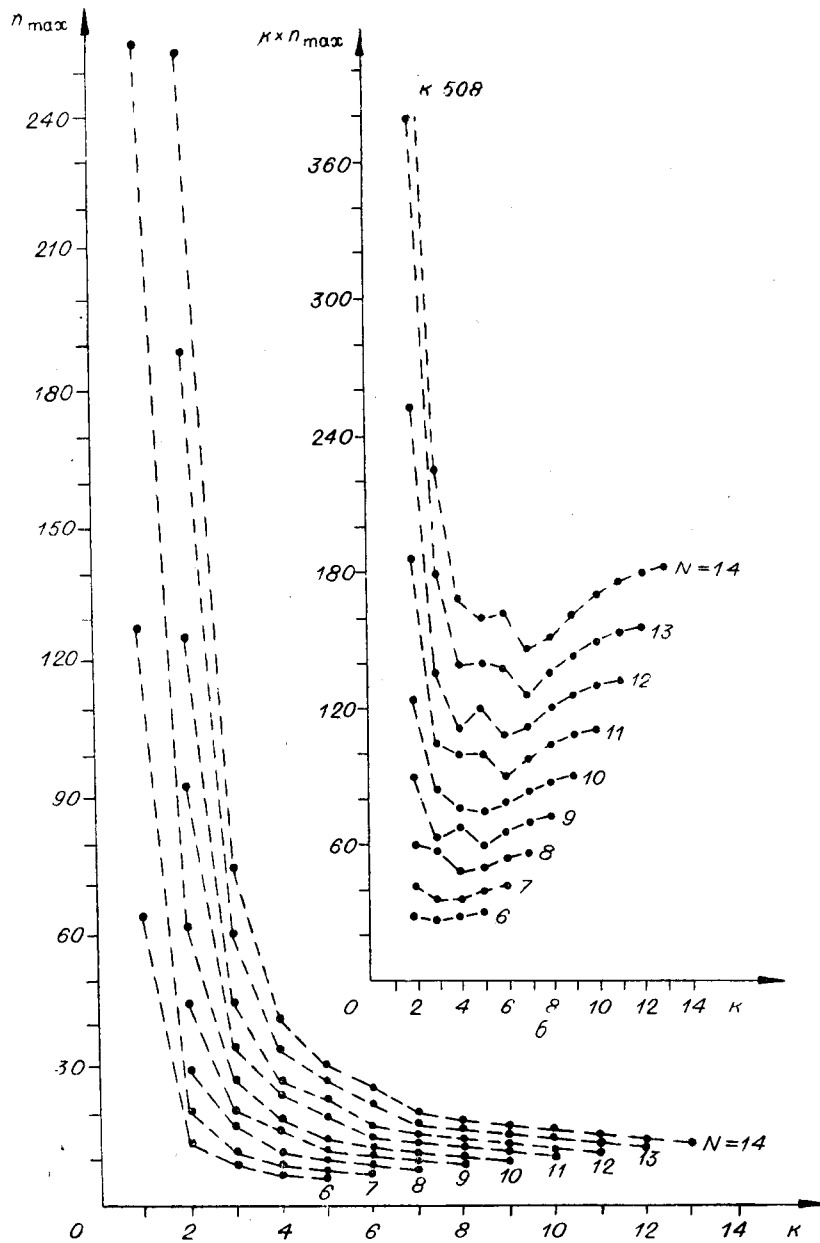


Рис. 1.

ния и числом пороговых устройств для десятичных АЦП приведены в табл. 2—3. Графического построения этих зависимостей не производилось ввиду их недостаточной наглядности.

Графики рис. 1, а и 3, а и данные табл. 2, А, 3, А относятся к случаю, когда компенсационная величина формируется ступенями, значения которых равны весовым значениям разрядов, причем рис. 1, а и табл. 2, А соответствуют неравномерно развертывающим АЦП, а рис.

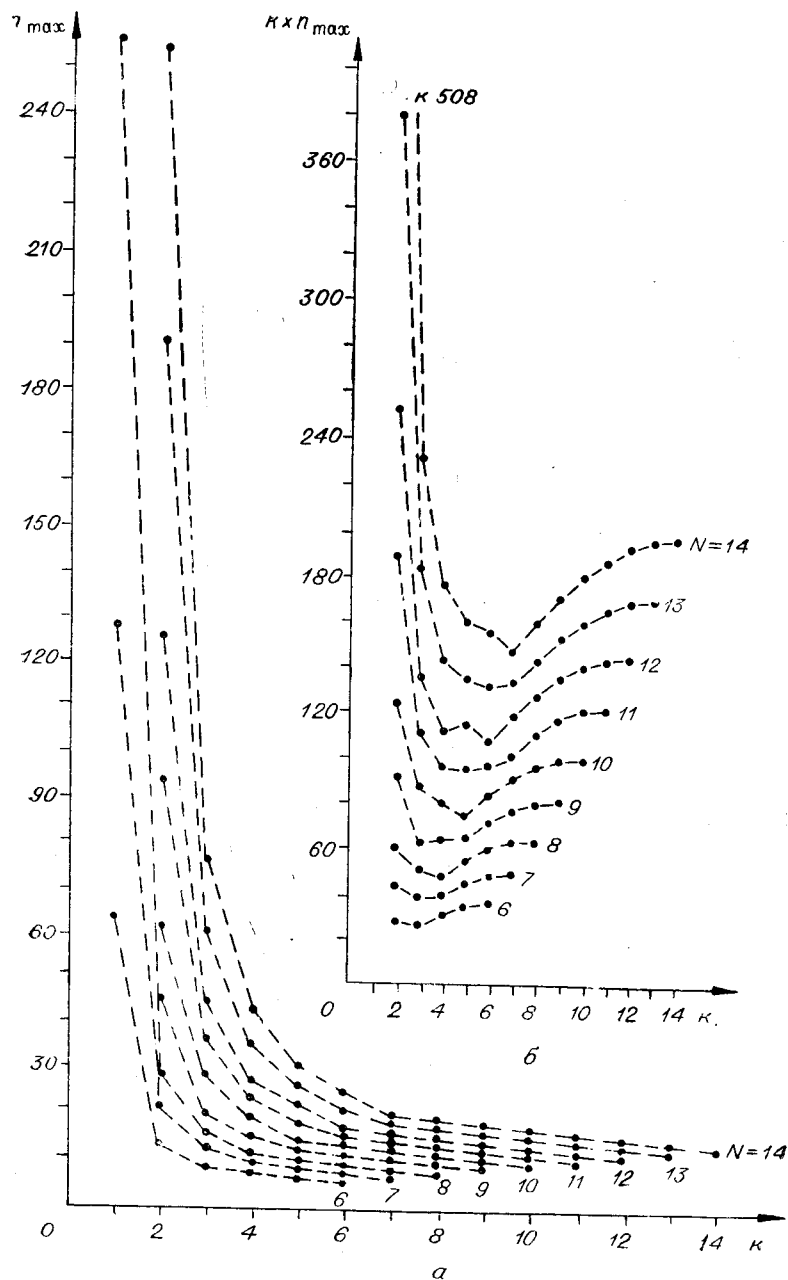


Рис. 2.

3, а и табл. 3, А — неравномерно следящим приборам. Графики рис. 2, а и 4, а и данные табл. 2, Б, 3, Б относятся к случаю, когда компенсационная величина формируется ступенями, значения которых равны суммам весовых значений разрядов, т. е. отсутствует блокировка включения весовых значений младших сработавших разрядов. При этом рис. 2, а и табл. 2, Б соответствуют неравномерно развертывающим АЦП, а рис. 4, а и табл. 3, Б — неравномерно следящим.

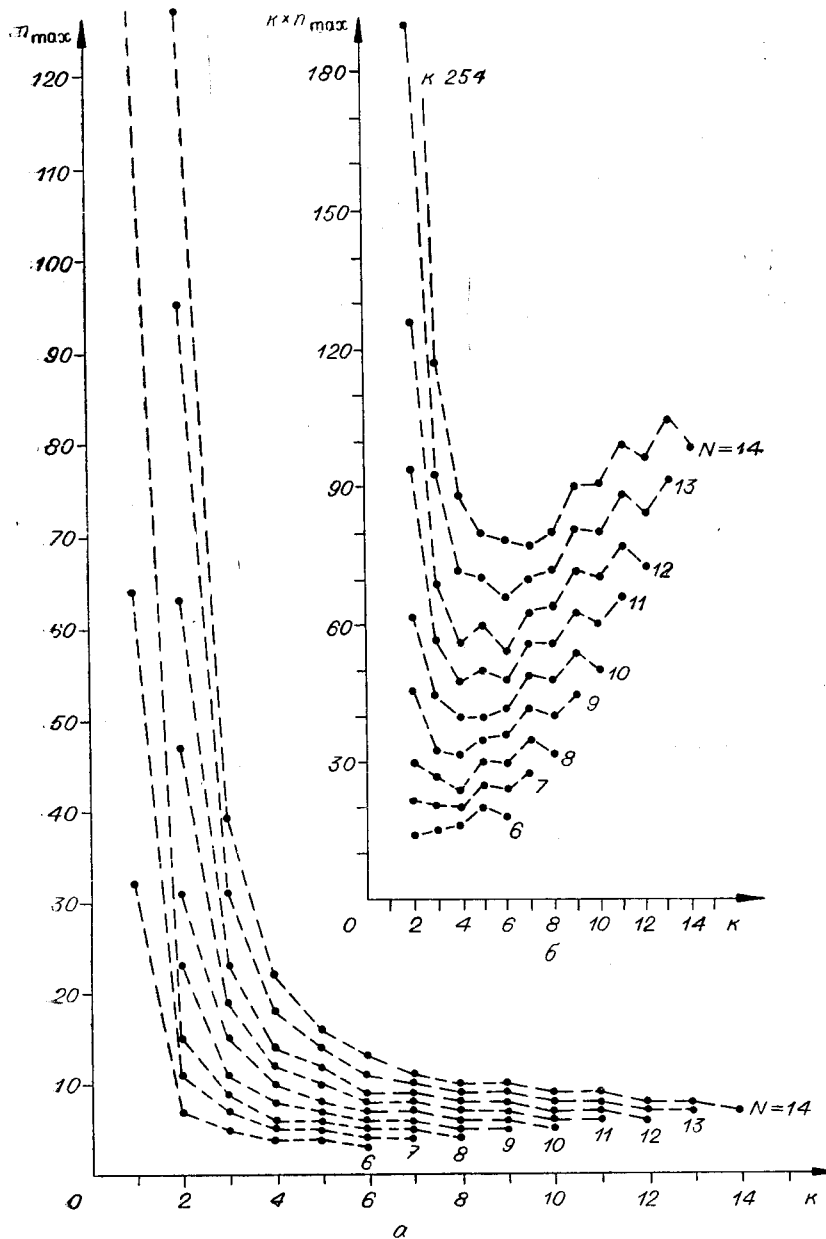


Рис. 3.

Из приведенных графиков следует, что зависимость максимального числа тактов уравнивания двоичных неравномерно развертывающих и неравномерно следящих АЦП от числа пороговых устройств носит гиперболический характер, причем при уменьшении числа пороговых устройств от наибольшего возможного до некоторого максимального число тактов уравнивания растет линейно, увеличиваясь на единицу при уменьшении на единицу числа пороговых устройств. При дальнейшем уменьшении числа пороговых устройств максимальное число

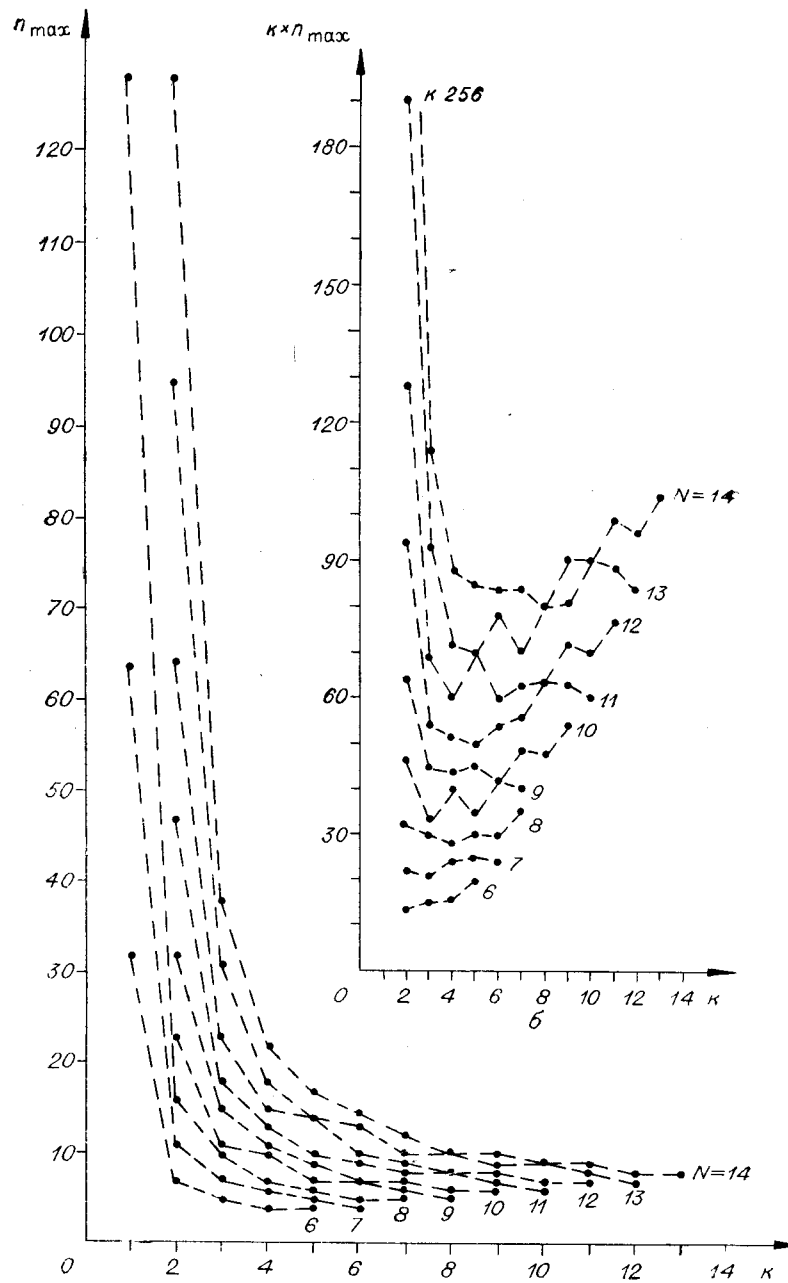


Рис. 4.

тактов уравнивания увеличивается нелинейно и резко возрастает.

Анализ полученных результатов показывает, что существует оптимальное число пороговых устройств, при котором его произведение на максимальное число тактов уравнивания ( $k \times n_{\max}$ ) будет минимальным (см. рис. 1, б — 4, б). Это оптимальное число для неравномерно развертывающих двоичных АЦП в случае формирования компенса-

пороговых устройств $k$	Оптимальные значения ступеней компенсационной величины $\Delta_i$ , $A_k$ в $\Delta^*$	срабатывания $A_{пор_i}$ в $\Delta$	уравновешивания $n_{max}$
<i>Для 8-разрядных АЦП</i>			
2	17,1	9; 0,75	16
3	35,3,1	19,2; 0,75	10
4	51,19,3,1	35,11,2; 0,75	7
5	79,15,7,3,1	47,11,5,2; 0,75	6
6	63,31,15,7,3,1	47,23,11,5,2; 0,75	5
7	127,63,31,15,7,3,1	95,47,23,11,5,2; 0,75	5
<i>Для 10-разрядных АЦП</i>			
2	33,1	17; 0,75	32
3	73,9,1	41,5; 0,75	15
4	147,19,3,1	83,11,2; 0,75	11
5	307,51,19,3,1	179,35,11,2; 0,75	9
6	207,79,15,7,3,1	193,47,11,5,2; 0,75	7
7	319,63,31,15,7,3,1	191,47,23,11,5,2; 0,75	7
8	255,127,63,31,15,7,3,1	191,95,47,23,11,5,2; 0,75	6
9	511,255,127,63,31,15,7,3,1	383,191,95,47,23,11,5,2; 0,75	6

\*  $\Delta$  — единица дискретности (шаг квантования) шкалы.

Таблица 2

Зависимость максимального числа тактов уравновешивания неравномерно разветвляющихся десятичных АЦП от числа пороговых устройств при оптимальном выборе значений ступеней компенсационной величины и порогов срабатывания устройств сравнения

А. При значениях ступеней компенсационной величины, равных весовым значениям соответствующих разрядов

Б. При значениях ступеней компенсационной величины, равных суммам весовых значений разрядов

Число пороговых устройств $k$	Оптимальные значения ступеней компенсационной величины $\Delta_i$ , $A_k$ и порогов срабатывания $A_{пор_i}$ в $\Delta$	Максимальное число тактов уравновешивания $n_{max}$	Число пороговых устройств $k$	Оптимальные значения ступеней компенсационной величины $\Delta_i$ , $A_k$ и порогов срабатывания $A_{пор_i}$ в $\Delta$	Максимальное число тактов уравновешивания $n_{max}$
<i>Для 3-разрядных АЦП</i>			<i>Для 3-разрядных АЦП</i>		
2	10,1	108	2	11,1	99
3	100,10,1	27	3	111,11,1	27
<i>Для 4-разрядных АЦП</i>			<i>Для 4-разрядных АЦП</i>		
2	100,1	198	2	101,1	198
3	100,10,1	117	3	111,11,1	108
4	1000,100,10,1	36	4	1111,111,11,1	36
<i>Для 5-разрядных АЦП</i>			<i>Для 5-разрядных АЦП</i>		
2	100,1	1098	2	101,1	1089
3	1000,10,1	207	3	1011,11,1	197
4	1000,100,10,1	126	4	1111,111,11,1	117
5	10000,1000,100,10,1	45	5	11111,1111,111,11,1	45

ционной величины ступенями, равными весовым значениям разрядов, может быть определено из выражения

$$k_{opt} = N - \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor,$$

а в случае формирования компенсационной величины ступенями, значения которых равны суммам весовых значений разрядов — из выражения

$$k_{opt} = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 1.$$

Таблица 3

Зависимость максимального числа тактов уравнивания неравномерно следящих десятичных АЦП от числа пороговых устройств при оптимальном выборе значений ступеней компенсационной величины и порогов срабатывания

Число пороговых устройств $k$	Оптимальное значение ступеней компенсационной величины $\Delta_i A_K$ в $\Delta$	Оптимальные значения порогов срабатывания $A_{пор_i}$ в $\Delta$	Максимальное число тактов уравнивания $n_{тах}$
<b>А. При значениях ступеней компенсационной величины, равных весовым значениям соответствующих разрядов</b>			
<i>Для 3-разрядных АЦП</i>			
2	100,1	51;0,75	59
3	100,10,1	55,6;0,75	19
4	999,100,10,1	550,55,6;0,75	14
<i>Для 4-разрядных АЦП</i>			
2	100,1	51;0,75	149
3	100,10,1	505,6;0,75	64
4	1000,100,10,1	550,6;0,75	23
5	9999,1000,100,10,1	5500,550,55,6;0,75	19
<i>Для 5-разрядных АЦП</i>			
2	1000,1	501,0;75	599
3	10000,100,1	5050,51,6;0,75	109
4	10000,100,10,1	5050,55,6;0,75	68
5	10000,1000,100,10,1	5500,550,55,6;0,75	28
6	99999,10000,1000,100,10,1	55000,5500,550,6;0,75	23
Число пороговых устройств $k$	Оптимальные значения ступеней компенсационной величины $\Delta_i A_K$ в $\Delta$	Оптимальные значения порогов срабатывания $A_{пор_i}$ в $\Delta$	Максимальное число тактов уравнивания $n_{тах}$
<b>Б. При значениях ступеней компенсационной величины, равных суммам весовых значений разрядов</b>			
<i>Для 3-разрядных АЦП</i>			
2	101,1	51;0,75	59
3	111,11,1	61,6;0,75	19
4	999,111,11,1	555,61,6;0,75	14
<i>Для 4-разрядных АЦП</i>			
2	101,1	51;0,75	149
3	1011,11,1	511,6;0,75	58
4	1111,111,11,1	611,61,6;0,75	23
5	9999,1111,111,11,1	5555,611,61,6;0,75	20
<i>Для 5-разрядных АЦП</i>			
2	1001,1	501;0,75	599
3	10101,101,1	5101,51;0,75	109
4	10111,111,11,1	5111,61,6;0,75	64
5	11111,1111,111,11,1	6111,611,61,6;0,75	28
6	99999,11111,1111,111,11,1	55555,6111,611,61,6;0,75	24

Таким образом, это оптимальное число пороговых устройств приблизительно равно половине максимально возможного.

Для неравномерно следящих двоичных АЦП оптимальное число пороговых устройств колеблется около значений, вычисленных по соответствующим формулам, приведенным выше, и могут отличаться от них на единицу. Практически, для 14-разрядных двоичных АЦП уже 5 пороговых устройств вместо 14 повышают максимальное число тактов уравнивания как в том, так и в другом случае всего в два раза по сравнению с наименьшим.



Что же касается десятичных АЦП, то, как видно из приведенных таблиц, значительное уменьшение числа тактов уравнивания также может быть достигнуто при использовании всего двух или трех пороговых устройств. При этом следует учитывать, что в случае неравномерно следящих десятичных АЦП диапазон измеряемых величин увеличивается в два раза по сравнению с неравномерно развертывающимися при одинаковой указанной разрядности приборов.

## ВЫВОДЫ

Достаточно существенного уменьшения максимального числа тактов уравнивания как неравномерно развертывающихся, так и неравномерно следящих АЦП, при котором максимальное число тактов не намного превышает минимально возможное, можно достичь, используя число пороговых устройств значительно меньшее, чем число разрядов прибора. Конкретные значения необходимого числа пороговых устройств во всех практически важных случаях можно получить из прилагаемых графиков и таблиц, исходя из допустимого максимального числа тактов уравнивания.

Способ формирования компенсационной величины (ступенями, равными весовым значениям разряда, или ступенями, равными суммам весовых значений разрядов) весьма незначительно сказывается на максимальном числе тактов уравнивания АЦП при любом числе пороговых устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Шлыкков. Цифровой вольтметр с параллельно-последовательной обработкой.— Приборостроение, 1966, № 3.
2. J. R. Cox, D. H. Glaeser. A Quantizing Encoder.— IEEE Trans., 1964, v. EC—13, № 3.
3. Г. П. Шлыкков. О быстродействии и динамической погрешности цифровых измерительных приборов с параллельно-последовательным уравниванием.— Автометрия, 1968, № 3.
4. Г. Г. Матушкин. Об оптимальном выборе ступеней компенсационной величины в автоматических цифровых измерительных приборах (АЦИП) неравномерно уравнивания.— В сб. «Вероятностные методы в измерении и контроле». (Труды семинара). Новосибирск, «Наука», 1968.
5. И. Ф. Клисторин, Г. Г. Матушкин. О выборе порогов срабатывания устройства сравнения цифрового измерительного прибора неравномерно следящего уравнивания.— Автометрия, 1967, № 2.

*Поступила в редакцию  
16 октября 1968 г.*