

УДК 006.002

## К ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ОБОБЩЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**К.С. Полулях**, кандидат технических наук, профессор Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ")

**И.И. Тополов**, старший преподаватель НТУ "ХПИ", г. Харьков

**Л.А. Медведева**, доцент НТУ "ХПИ", г. Харьков



К.С. Полулях

И.И. Тополов

Л.А. Медведева

*Предложено использование видов преобразуемых величин в качестве признаков для деления цифровых преобразователей на подгруппы. Разработана классификация на основе двух признаков: алгоритма цифрового преобразования и вида преобразуемой величины.*

*The usage of the types of convertible quantities as attributes for division of the digital converters into subgroups is proposed. The classification based on two attributes: the algorithm of digital conversion and the type of convertible quantity is developed.*

Данная работа является продолжением статьи этих же авторов под названием "К теоретическому обоснованию построения классификации цифровых измерительных приборов", опубликованной в № 3/2014 "Українського метрологічного журналу".

### Обобщенный алгоритм цифрового преобразования

В вышеназванной работе цифровые преобразователи разделены на группы: *последовательного счета, поразрядного уравнивания и параллельно-последовательного преобразования*. Указанная классификация выполнена на основе использования типа алгоритма цифрового преобразования в качестве признака для деления преобразователей на группы.

Преобразование непрерывных величин в цифровую форму основано на сравнении преобразуемых величин с образцовой мерой. Этот процесс можно представить в виде обобщенного алгоритма цифро-

вого преобразования, справедливого для всех типов преобразователей, как показано в предыдущей работе.

Обобщенный алгоритм цифрового преобразования представляется в виде пошагового процесса, состоящего из следующих операций, выполняющихся в каждом шаге:

- формирование тактового импульса;
- формирование ступени образцовой меры, которая прибавляется к сумме ступеней, полученных в предыдущих шагах;
- сравнение суммы образцовых ступеней меры с преобразуемой величиной;
- по результатам сравнения выполнение аналитических операций, характер которых зависит от группы классификации, в том числе определение необходимости следующих шагов;
- определение в каждом шаге кода полученной суммы ступеней образцовых мер. Этот код называется промежуточным кодом. Код, сформированный в последнем шаге, является результатом преобразования и называется первичным кодом.

Подчеркнем, что основной частью алгоритма преобразования является способ формирования суммы ступеней меры и определение кода этой суммы.

### Основные подходы для создания обобщенной классификации цифровых преобразователей

Кроме выполнения деления цифровых устройств на группы, с использованием в качестве признака типа алгоритма цифрового преобразования, представляет интерес исследование характера процесса цифрового преобразования для преобразуемых величин различного рода. Эти сведения необходимо знать при проектировании цифровых устройств, так как пригодность определенного рода преобразуемой величины для цифрового преобразования часто оказывается возможной при использовании аппаратуры, принадлежащей только к одной классификационной группе и непригодной для других групп.

В литературе практически не рассмотрены особенности процесса преобразования с учетом рода

преобразуемых величин и типов классификационных групп.

Обоснованный выбор группы классификации является важным, так как указанные группы преобразователей имеют различные характеристики по быстродействию, конструктивным особенностям, используемому коду и т. п.

Существующий перечень непрерывных величин, которые могут быть преобразованы в цифровой код, а именно перемещение, частота, напряжение, указанные, например, в литературе [1, 2], не имеют наименования классификационных групп, в которых эти величины могут быть преобразованы.

В [2] имеются краткие указания о возможности построения классификации с использованием в качестве признака рода преобразуемой величины.

Так как приведенные литературные данные не удовлетворяют практические потребности, данная работа посвящена созданию обобщенной классификации цифровых преобразователей, основанной на использовании в качестве классификационных признаков как алгоритма цифрового преобразования, так и вида преобразуемой величины.

Разработанная классификация представлена в виде таблицы.

#### Алгоритм цифрового преобразования в качестве признака для деления преобразователей на группы

Цифровое преобразование в устройствах АЦП основано на последовательном сравнении преобразуемой величины с образцовыми степенями меры, суммарное значение которых выражается в позиционном коде.

В преобразователях группы последовательного счета формируется равномерно-ступенчатая форма меры, которая соответствует единичному коду. Для получения позиционного кода каждая единичная ступень меры сопровождается тактовым импульсом, который проходит на счетчик, где формируется двоичный или двоично-десятичный код. Число шагов преобразования равно количеству тактовых импульсов.

В группе поразрядного уравнивания результат преобразования получают в виде двоичного или двоично-десятичного кодов за счет формирования образцовых степеней меры, величина которых соответствует вышеупомянутым кодам, причем уравнивание начинается со старшего разряда, а число шагов уравнивания равно количеству разрядов. Как известно, для указанных систем счисления базисное число  $P = 2$ .

В преобразователях параллельно-последовательной группы используется способ формирования степеней меры, аналогичный алгоритму предыдущей группы. Отличие состоит в использовании систем счисления, для которых базисное число  $P > 2$ , то есть для троичной... пятеричной... десятичной и других систем.

Преобразователи, относящиеся к группам, использующим в качестве признаков алгоритмы цифрового преобразователя, размещены в вертикальных колонках таблицы.

#### Вид преобразуемой величины в качестве признака для деления преобразователей на подгруппы

В каждой группе преобразователей возможно выполнение цифрового преобразования для различных видов преобразуемых величин, поэтому указанные преобразователи целесообразно разделить на подгруппы, используя в качестве признака вид преобразуемой величины. Для решения этой задачи необходимо определить перечень видов физических величин, пригодных для цифрового преобразования.

Материальный мир определяется величинами, которые считаются основными и существуют независимо от деятельности человека, а также величинами, возникающими в результате человеческой деятельности, которые в метрологии принято называть производными.

Окружающая среда представляется в виде материи, причем объективная форма существования материи – это пространство и время, а также электромагнитное поле, которое является особой формой материи.

Основными будем считать величины, характеризующие параметры основных областей материального мира, то есть основными величинами являются:

- относительное значение перемещения в пространстве  $l$  (расстояние, определяемое как разность между начальным и конечным положениями некоторого объекта в пространстве) или размер объекта, характеризующийся его границами. Эти величины можно назвать пространственными отрезками;

- временной интервал  $t$ , который характеризуется как разность между моментами появления двух событий. Чаще всего этими событиями являются начальный и конечный импульсы, определяющие длительность временного отрезка;

- электромагнитное поле, которое является особой формой существования материи. Основная характеристика электромагнитного поля – разность электрических потенциалов, то есть напряжение  $U$ .

Уравнения производных величин выражаются через значения основных единиц. Например:  $V = l/t_0$  – скорость;  $f = N_x/t_0$  – частота импульсов, число которых за время  $t_0$  равно  $N_x$ .

Каждая группа цифровых преобразователей разделена на подгруппы на основании использования вида преобразуемой величины в качестве признака для разделения подгрупп.

Преобразователям, помещенным в таблице обобщенной классификации, присвоены номера, которые совпадают с обозначениями разделов статьи, где дано описание соответствующих преобразователей.

Таблица обобщенной классификации цифровых измерительных приборов

Группы цифровых измерительных приборов	Подгруппы цифровых измерительных приборов		
	Пространственная область	Временная область	Электромагнитное поле
1 →	1.1	1.2	1.3
Преобразователь последовательного счета	1.1.1 $\ell_x = \Delta\ell \cdot N_x$	1.2.1 $t_x = \Delta t \cdot N_x$	1.3.1 $U_x = \Delta U \cdot N_x$
	1.1.2 $V_x = \Delta V \cdot N_x$	1.2.2 $f_x = \Delta f \cdot N_x$	1.3.2 $V_x = \Delta V \cdot N_x$
2 →	2.1	2.2	2.3
Преобразователь поразрядного уравнивания	—	—	$U_x = \Delta U \sum_{\alpha=\beta}^1 a_\alpha 2^{\alpha-1} = \Delta U \cdot N_x$
3 →	3.1	3.2	3.3
Преобразователь параллельно-последовательного типа	—	—	$U_x = \Delta U \sum_{i=m}^1 A_i P^{i-1} = \Delta U \cdot N_x$

**1. Преобразователи группы последовательного счета**

В этой группе цифровых преобразователей последовательного счета поочередно проверяются на пригодность к цифровому преобразованию величины, относящиеся к пространственной (1.1), временной (1.2) областям, а также к электромагнитному полю (1.3), как указано в таблице обобщенной классификации. Требуется проверить соответствие образцовой меры требованиям алгоритма группы последовательного счета, которые приводятся ниже.

1.1. Требования алгоритма группы последовательного счета:

- преобразуемая величина должна быть однородной с образцовой мерой;
- единичная мера должна быть воспроизводима в виде эталона с точностью, удовлетворяющей требованиям науки и техники;
- должен существовать способ сравнения преобразуемой и образцовой величин;
- при каждом шаге должна быть возможность формирования промежуточного кода суммы ступеней образцовой меры;
- должна быть возможность формирования равномерно-ступенчатой образцовой меры.

1.1.1. Методы определения параметров пространственной области. Для пространственной области определяются относительные значения перемещения в пространстве. Рассмотрим метод преобразования расстояния. Упрощенная схема преобразователя показана на рис. 1а. Преобразователь предназначен для измерения расстояния, пройденного транспортным средством. Расстояние  $\ell_x$  определяется по количеству оборотов мерного колеса с длиной обода  $\Delta\ell = \pi \cdot D$ , где  $D$  — диаметр колеса.

При нахождении мерного колеса в положении В заканчивается формирование образцовой единичной меры  $\Delta\ell$ , в этот момент на выходе формирова-

теля импульса  $\phi - l_k$  возникает тактовый импульс, проходящий на вход счетчика СТ.

Следовательно, в каждом шаге формируются единичная образцовая мера  $\Delta\ell$ , а также тактовый импульс, что соответствует обобщенному алгоритму цифрового преобразования.

Отметим, что процесс преобразования не ограничивается временными рамками, то есть перемещение транспортного средства может проходить

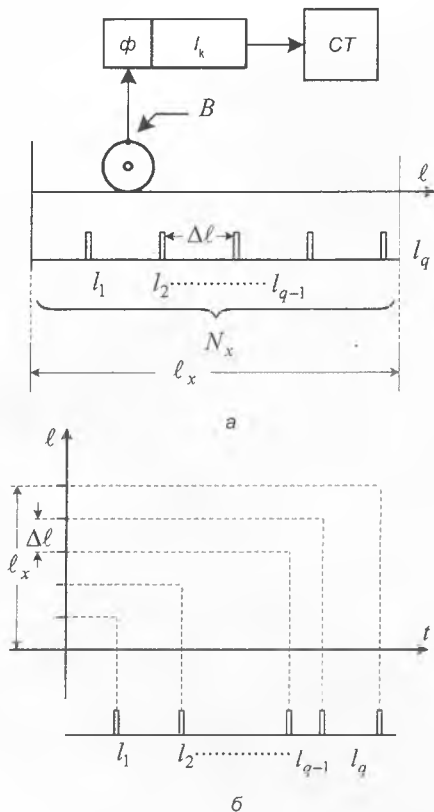


Рис. 1. Преобразователь перемещения: а – упрощенная схема; б – временный график преобразования

с переменной скоростью и даже с остановками, как показано на рис. 1б.

Значение преобразуемой величины  $\ell_x$  определяется уравнением

$$\ell_x = \Delta\ell \cdot N_x.$$

Серия импульсов (рис. 1), которые проходят в течение времени цифрового преобразования, часто называется числоимпульсным кодом.

В литературе иногда встречается ошибочное утверждение, например [3], что в процессе цифрового преобразования формируется числоимпульсный код, который затем преобразуется в другие коды.

В действительности по окончании цифрового преобразования серия импульсов заканчивается и дальнейшее преобразование невозможно. Поэтому числоимпульсный код в течение времени измерения должен быть преобразован в единичный или двоичный позиционный код.

Полученный единичный код может быть представлен в виде уравнения

$$N_x = I_1 + I_2 + \dots + I_k + \dots + I_q, \quad (1)$$

где  $I_k$  – обозначение импульса с номером  $k$ , в дальнейших уравнениях данный символ имеет числовое значение, равное единице;  $q$  – номер последнего импульса.

Для представления значения  $\ell_x$  уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\ell_x = \Delta\ell \cdot I_1 + \Delta\ell \cdot I_2 + \dots + \Delta\ell \cdot I_k + \dots + \Delta\ell \cdot I_q = \Delta\ell \cdot N_x.$$

В обобщенной форме

$$\ell_x = \sum_{k=1}^q \Delta\ell \cdot I_k. \quad (2)$$

Единичный код непригоден для практических целей, поэтому в приборах последовательного счета результат преобразования  $N_x$  представляется в двоичном или двоично-десятичном кодах в зависимости от используемого счетчика.

В двоичной системе  $N_x$  определится суммой

$$N_x = \sum_{\alpha=\beta}^1 a_\alpha b_\alpha = a_\beta b_\beta + \dots + a_\alpha b_\alpha + \dots + a_2 b_2 + a_1 b_1,$$

где  $a_\alpha b_\alpha$  – разрядная аддитивная слагаемая с номером  $\alpha$ ;  $a_\alpha$  – разрядный коэффициент с номером  $\alpha$ , принимающий значения 0 или 1;  $b_\alpha = P^{\alpha-1}$  – вес разряда с номером  $\alpha$ ;  $\beta$  – номер старшего разряда (число разрядов);  $P=2$  – базисное число двоичной системы счисления.

Код  $N_x$  определится последовательностью разрядных коэффициентов  $a_\alpha$ , если порядок коэффициентов начинается со старшего разряда  $a_\beta$ : код  $N_x = a_\beta; a_{\beta-1}; \dots; a_\alpha; \dots; a_2; a_1$ .

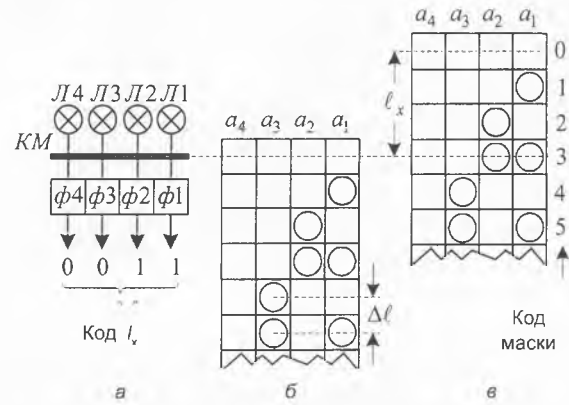


Рис. 2. Преобразователь перемещения с кодовой маской: а – считывающее устройство (Л1...Л4 – источники света; ф1...ф4 – фотоэлементы; КМ – кодирующая маска); б – начальное и в – конечное положения маски при квантовании ( $\ell_x = 3\Delta\ell$ ;  $a_1, \dots, a_4$  – разрядные коэффициенты)

Существуют другие типы преобразователей перемещения, например, использующие рейки с отверстиями на равных расстояниях. При перемещении рейки луч света через отверстия попадает на фотоэлементы (ФЭ). При изменении состояния ФЭ возникают импульсы, число которых пропорционально перемещению рейки.

Некоторые устройства конструктивно представляют сочетание специальной кодирующей маски и считывающего устройства. На рис. 2 показана кодирующая маска с четырьмя двоичными разрядами. Кодирующая маска с отверстиями, расположенными в соответствии с двоичным кодом, перемещается на величину  $\ell_x$  вдоль зазора между источниками света и фотоэлементами. Выходные сигналы фотоэлементов образуют двоичный код, пропорциональный преобразуемому значению перемещения. Кодирующие маски обеспечивают высокую разрешающую способность (свыше 20 двоичных разрядов), малую погрешность квантования и высокое быстродействие (миллионы преобразований в секунду) [4].

Величина перемещения пригодна для цифрового преобразования, поэтому описанные методы включим в таблицу обобщенной классификации под номером 1.1.1.

1.1.2. Цифровой измеритель производной величины, которая относится к пространственной области. В качестве производной величины, которая относится к пространственной области, примем скорость  $V_x$  перемещения транспортного средства.

Скорость определяется по количеству импульсов датчика, размещенного на колесе за постоянное время  $t_0$ , получаемое от преобразователя  $\phi - t_0$ .

Процесс преобразования соответствует обобщенному алгоритму цифрового преобразования. В каждом шаге формируются тактовый импульс и единичная образцовая мера, которая добавляется к суммарной мере, полученной в предыдущих шагах.

Как следует из графика рис. 3б, за время измерения  $t_0$  транспортное средство переместится

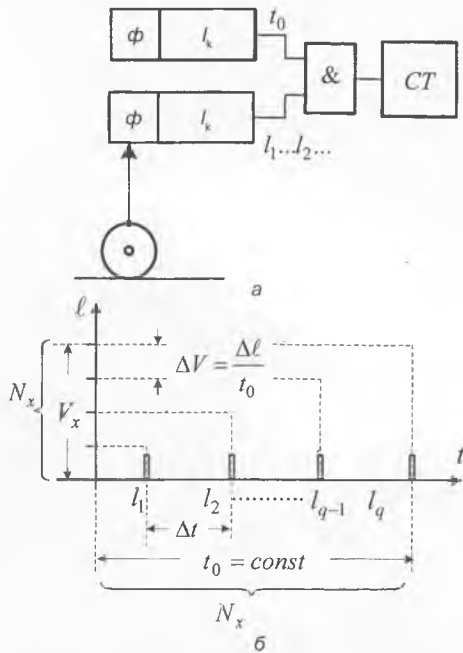


Рис. 3. Цифровой преобразователь скорости: а – схема; б – принцип работы

на величину  $l_0 = \Delta l \cdot N_x$ , а скорость  $V_x$  определится уравнением

$$V_x = \frac{l_0}{t_0} = \frac{\Delta l \cdot N_x}{t_0} = \Delta V \cdot N_x = \Delta l \cdot f_0, \quad (3)$$

где  $\Delta V = \Delta l / t_0$  – образцовая единичная мера скорости, физический смысл которой определяется как величина приращения скорости в течение одного шага;  $f_0 = N_x / t_0$  – частота вращения колеса.

Выразим  $V_x$  через пошаговые составляющие:

$$V_x = \sum_{k=1}^q \Delta V \cdot l_k = \sum_{k=1}^q \left( \frac{\Delta l}{t_0} \right) \cdot l_k = \frac{\Delta l}{t_0} N_x.$$

Это уравнение можно представить в форме (2), следовательно, величина скорости пригодна для цифрового преобразования, поэтому данный метод можно внести в обобщенную таблицу классификации под номером 1.1.2.

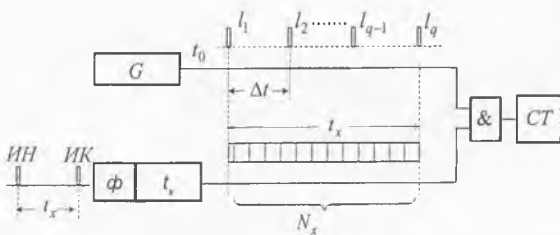


Рис. 4. Цифровой преобразователь временного отрезка: ИН, ИК – начальный и конечный импульсы;  $\Phi-t_x$  – формирователь временного отрезка  $t_x$ ; G – генератор стабильной частоты;  $\Delta t$  – период генератора; СТ – счетчик импульсов

1.2. Преобразователи величин, определяющие параметры временной области. Время, как одна из форм существования материи, является величиной особой категории, понятие о которой определяется как условная сравнительная мера движения материи, которое проходит лишь в одном направлении из прошлого через настоящее в будущее. Причем течение времени всюду и везде в мире одинаково и не может изменяться от воздействия каких-либо факторов.

Время является величиной, которую мы не можем оценивать безотносительно к самому процессу непрерывного течения времени. Поэтому нельзя определить длительность временного интервала без немедленного преобразования этого интервала в какую-то другую величину, которую можно зафиксировать (остановить время), как отмечено в работе [5].

1.2.1. Цифровой преобразователь временного отрезка. Упрощенная схема преобразователя временного отрезка  $t_x$  в код  $N_x$  показана на рис. 4.

В соответствии с принятым подходом, будем считать, что в каждом шаге формируются единичная образцовая мера в виде периода  $\Delta t$  генератора стабильной частоты G, а также тактовые импульсы  $l_1, l_2, \dots$ , которые проходят в счетчик, где формируются промежуточные коды. При последнем шаге будет получен результирующий код, называемый первичным. Процесс цифрового преобразования может быть представлен в виде уравнения

$$t_x = \sum_{k=1}^q \Delta t \cdot l_k = \Delta t \cdot l_1 + \Delta t \cdot l_2 + \dots + \Delta t \cdot l_{q-1} + \Delta t \cdot l_q = \Delta t \cdot N_x.$$

Следовательно, процесс цифрового преобразования  $t_x$  соответствует обобщенному алгоритму, а величина  $t_x$  пригодна для цифрового преобразования, и данный метод может быть помещен в классификационную таблицу под номером 1.2.1.

1.2.2. Производная величина временной области. Уравнение этой величины можно представить, как в предыдущих случаях, путем деления  $N_x$  на основную величину, которой является  $t_0$ .

В виде производной величины временной области будет частота  $f$ . Упрощенная схема цифрового преобразователя частоты представлена на рис. 5.

Определим значение образцовой единичной меры. Представим уравнение обобщенного алгоритма при измерении величины X:

$$X = \Delta x \cdot N_x,$$

где  $\Delta x$  – значение единичной образцовой меры.

Для случая преобразования частоты  $f_x$  получим

$$f_x = \Delta f \cdot N_x.$$

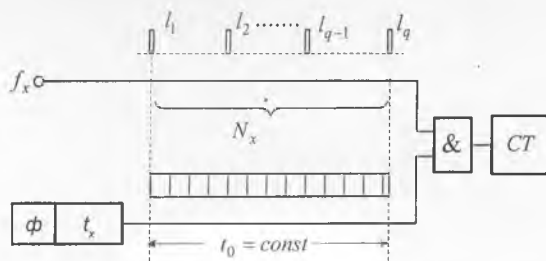


Рис. 5. Цифровой преобразователь частоты:  $\phi-t_x$  – формирователь образцового временного отрезка  $t_0$ ;  $CT$  – счетчик импульсов

Действительное значение  $f_x$  будет

$$f_x = N_x / t_0$$

Из последних двух уравнений найдем уравнение образцовой меры для преобразователя частоты:

$$\Delta f = 1/t_0 = const$$

Уравнение для преобразования частоты в общем виде представим в следующей форме:

$$f_x = \sum_{k=1}^q \Delta f \cdot l_k = \sum_{k=1}^q \frac{1}{t_0} \cdot l_k = \frac{1}{t_0} \cdot l_1 + \frac{1}{t_0} \cdot l_2 + \dots + \frac{1}{t_0} \cdot l_{q-1} + \frac{1}{t_0} \cdot l_q = \frac{N_x}{t_0}$$

Так как полученное уравнение при  $t_0 = const$  удовлетворяет требованиям цифрового преобразования, величина  $f_x$  пригодна для цифрового преобразования и может быть включена в таблицу классификации под номером 1.2.2.

1.3. Преобразователи величин, определяющие параметры электромагнитного поля. Кроме всеобщих объективных форм существования материи, которыми являются пространство и время, следует отметить наличие особых форм материи, к числу которых относится электромагнитное поле.

Основные характеристики электромагнитного поля – разность электрических потенциалов и электрическое напряжение.

1.3.1. Равномерно-ступенчатый АЦП. Равномерно-ступенчатый АЦП предназначен для цифрового преобразования напряжения и по принципу действия соответствует приборам последовательного счета. Упрощенная схема АЦП представлена на рис. 6а.

Его принцип работы состоит в следующем. Импульс запуска ИЗ открывает логический ключ И и на вход счетчика проходят тактовые импульсы от генератора G. При каждом шаге в счетчике формируются промежуточные коды образцовой меры, которые проходят на ЦАП, на выходе которого возникает образцовое напряжение  $U_m$ , поступающее на сравнивающее устройство. Преобразование заканчивается, когда образцовая мера  $U_m$  совпадает по величине с преобразуемым напряжением  $U_x$ ,

как показано на рис. 6б. Полученный в счетчике код определяет результат преобразования. Так как при каждом шаге код счетчика возрастает на единицу, процесс преобразования можно представить уравнением

$$U_x = \sum_{k=1}^q \Delta u \cdot l_k = \Delta u \cdot l_1 + \Delta u \cdot l_2 + \dots + \Delta u \cdot l_{q-1} + \Delta u \cdot l_q = \Delta u \cdot N_x,$$

где  $k$  – номер шага;  $q$  – номер последнего шага;  $\Delta u$  – образцовая единичная мера.

Полученное уравнение подтверждает пригодность данного метода для цифрового преобразования напряжения, поэтому его следует включить в классификационную таблицу под номером 1.3.1.

1.3.2. Цифровое преобразование производной величины, которая относится к электромагнитному полю. В качестве производной величины, которая относится к электромагнитному полю, примем, по аналогии с разделом 1.1.2, скорость формирования ступеней образцовой меры напряжения  $V_x$ . Воспользовавшись уравнением (3), для электромагнитного поля получим формулу

$$V_x = \frac{U_0}{t_0} = \frac{\Delta U \cdot N_x}{t_0} = \Delta V \cdot N_x = \Delta U \cdot f_0,$$

где  $f_0 = N_x / t_0$  – частота импульсов, проходящих от генератора на счетчик;  $\Delta V = \Delta U / t_0$  – образцовая единичная мера скорости формирования образцовой меры, физический смысл которой определяется как величина приращения скорости в течение одного шага.

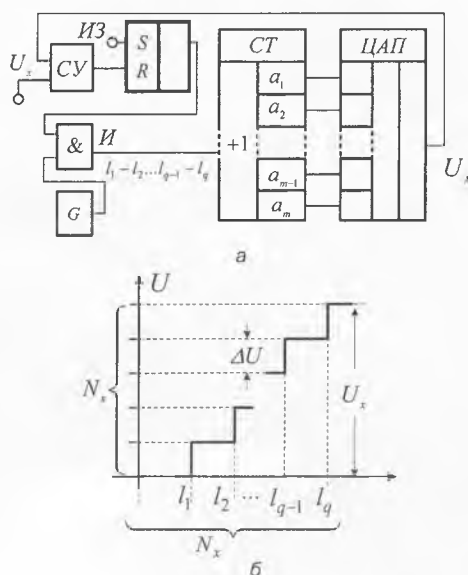


Рис. 6. Равномерно-ступенчатый АЦП: а – схема прибора; б – принцип действия

По аналогии с 1.1.2, преобразователь под номером 1.3.2 следует включить в классификационную таблицу.

**2. Преобразователи группы поразрядного уравнивания**

Для того чтобы оценить пригодность к цифровому преобразованию параметров, относящихся к пространственной и временной областям, а также к электромагнитному полю при использовании в аппаратуре группы поразрядного уравнивания, определим требования к цифровому преобразованию аппаратуры указанной группы.

Алгоритм цифрового преобразования группы приборов поразрядного уравнивания характеризуется тем, что сравнение образцовых мер с преобразуемой величиной происходит ступенями, величина которых выбирается в соответствии с двоичным или двоично-десятичным кодами, причем уравнивание начинается со старшего разряда.

С учетом приведенных требований исследуем возможность реализации алгоритма приборов поразрядного уравнивания для цифрового преобразования величин, относящихся к пространственной и временной областям, а также к электромагнитному полю.

2.1. Формирование ступеней величин, относящихся к пространственной области в последовательности, соответствующей двоичному или двоично-десятичному кодам, технически невозможно из-за сложного механического устройства. Отсюда следует, что для данного вида преобразуемых величин цифровое преобразование невозможно, что отметим в таблице классификации под номером 2.1.

2.2. По этой же причине для вида преобразуемых величин, относящихся к временной области, выполнить цифровое преобразование невозможно, что отметим в таблице классификации под номером 2.2.

2.3. Вольтметр поразрядного уравнивания. Выполнение требования реализации алгоритма цифрового преобразования в аппаратуре поразрядного уравнивания возможно в случае преобразования напряжения, которое относится к области электромагнитного поля.

Пригодность напряжения к цифровому преобразованию объясняется тем, что напряжение в виде образцовой меры может быть включено в любой последовательности величин ступеней.

Этот процесс можно описать уравнением

$$N_x = \sum_{\alpha=\beta}^1 a_\alpha P^{\alpha-1} = \sum_{\alpha=\beta}^1 a_\alpha b_\alpha, \quad (4)$$

где  $a_\alpha$  – разрядный коэффициент разряда с номером  $\alpha$ ;  $P=2$  – базисное число двоичной или двоично-десятичной позиционной системы счисления;  $\beta$  – номер старшего разряда;  $b_\alpha = P^{\alpha-1}$  – вес разряда с номером  $\alpha$ .

Разложив уравнение (4), получим значение  $N_x$  в виде суммы разрядных аддитивных слагаемых  $a_\alpha \cdot b_\alpha$ :

$$N_x = a_\beta b_\beta + \dots + a_\alpha b_\alpha + \dots + a_2 b_2 + a_1 b_1.$$

Из приведенного уравнения можно получить двоичный код результата измерения путем представления последовательности разрядных коэффициентов, начиная со старшего разряда:

$$N_x = a_\beta \dots a_\alpha \dots a_2 a_1,$$

где разрядные коэффициенты  $a_\alpha$  могут принимать значения 0 или 1.

В вольтметре поразрядного уравнивания, упрощенная схема которого показана на рис. 7а, величины ступеней образцовой меры выбираются в соответствии с двоичным или двоично-десятичным кодами.

В процессе преобразования тактовые импульсы поступают последовательно на S-выходы триггеров регистра RG, после прихода тактового импульса триггер переходит в состояние 1 и выходной импульс включает образцовую меру, равную весу старшего разряда цифро-аналогового преобразователя (вес старшего разряда – 8).

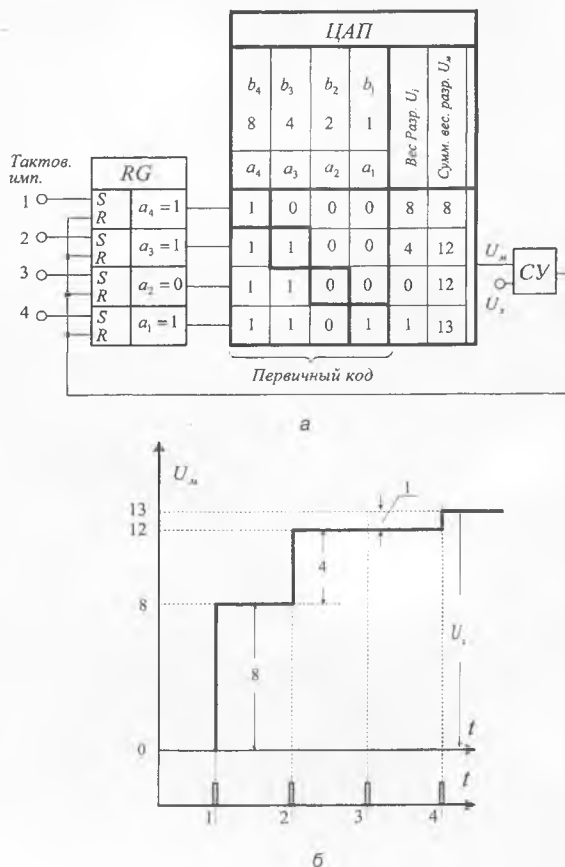


Рис. 7. Вольтметр поразрядного уравнивания: а – упрощенная схема; б – график преобразования

Код разряда представлен в обведенном квадрате. Так как  $8 < U_x = 13$  (рис. 7б), значение меры 8 остается включенным. При втором шаге процесс повторяется, суммарное значение меры будет 12. Перекомпенсация наступит после третьего импульса, поскольку суммарное значение меры  $14 > U_x = 13$ , поэтому ступень меры весом 2 отключится. При последнем шаге включится ступень меры, равная 1, уравнивание будет закончено.

При каждом импульсе будет формироваться промежуточный код суммарной меры, а при последнем шаге будет получен первичный код.

В поразрядном преобразователе алгоритм преобразования заключается в последовательном формировании образцовых мер, начиная со старшей, причем величина ступеней убывает в соответствии с двоичной или двоично-десятичной системами счисления, поэтому число шагов уравнивания равно количеству разрядов выбранной системы счисления, что значительно меньше, чем в группе последовательного счета.

Как видно из изложенного, напряжение пригодно для цифрового преобразования, поэтому данный метод преобразования можно включить в классификационную таблицу под номером 2.3.

### 3. Преобразователи группы параллельно-последовательного преобразования (считывания)

Оценим пригодность к цифровому преобразованию параметров, относящихся к пространственной и временной областям, также к электромагнитному полю при использовании в аппаратуре параллельно-последовательной группы.

Алгоритм работы приборов параллельно-последовательного преобразования (считывания) характерен тем, что сравнение образцовых мер с преобразуемой величиной происходит ступенями, величина которых выбирается в соответствии с позиционной системой более высокого порядка, чем двоичная или двоично-десятичная система. Для этих систем, которые называются троичными, пятеричными... десятичными и так далее, базисное число  $P$  удовлетворяет условию  $P > 2$  [6].

3.1. Цифровое преобразование параметров, характеризующих пространственную область, не может быть реализовано в аппаратуре параллельно-последовательного преобразования из-за технической сложности, что отмечено в таблице классификации в секторе под номером 3.1.

3.2. По этой же причине не может быть реализовано цифровое преобразование параметров временной области, что отмечено в таблице классификации в секторе под номером 3.2.

3.3. Алгоритм цифрового преобразования параметров электромагнитного поля в устройствах параллельно-последовательного типа. Подобно схемам поразрядного уравнивания процесс параллельно-

последовательного преобразования напряжения можно представить уравнением

$$N_x = \sum_{i=m}^l A_i \cdot P^{i-1} = \sum_{i=m}^l A_i \cdot B_i, \quad (5)$$

где для четкости представления параллельно-последовательного преобразования использованы другие обозначения по сравнению с группой поразрядного уравнивания. Представим эти обозначения:  $A_i$  – разрядный коэффициент, относящийся к разряду с номером  $i$ ;  $m$  – количество разрядов кода;  $B_i = P^{i-1}$  – вес разряда с номером  $i$ .

Разложив уравнение (5), найдем значение  $N_x$  в виде суммы разрядных аддитивных слагаемых принятого кода:

$$N_x = A_m \cdot B_m + A_{m-1} B_{m-1} + \dots + A_2 B_2 + A_1 B_1.$$

Из полученного уравнения можно найти код результата преобразования путем представления ряда разрядных коэффициентов:

$$N_x = A_m; A_{m-1}; \dots; A_2; A_1.$$

Разрядные коэффициенты могут принимать значения от 0 до  $P-1$ . Число шагов преобразования равно количеству разрядов. Так как разрядные коэффициенты могут принимать значения от 0 до  $P-1$ , эти величины не могут представляться двоичными элементами. Для этой цели используются многоустойчивые элементы с количеством состояний, равным  $P$ .

Многоустойчивые элементы реализуются в схемах преобразователей на основе использования параллельных АЦП.

Схема параллельного АЦП показана на рис. 8, где делитель напряжения формирует ступени  $\Delta U$  образцового напряжения. На один из входов сравнивающего устройства СУ поступает напряжение с делителя, на другой – преобразуемое напряжение  $U_x$ . Если  $U_x >$  напряжения делителя, СУ переходит в состояние 1. Пусть, например,  $U_x = 3,5 \cdot \Delta U$ .

В этом случае на выходах сравнивающих устройств будет получен единичный код 00111 = 3, который с помощью дешифратора ДШ преобразуется в двоичный код 0011 = 3.

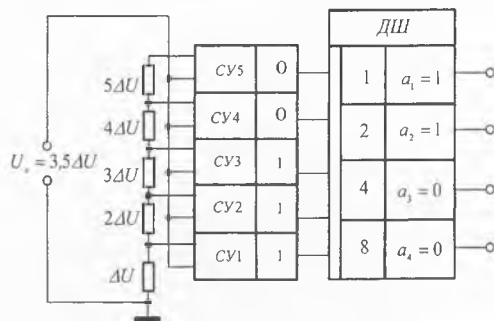


Рис. 8. Параллельный АЦП

Номинальное значение преобразуемого напряжения  $N_{xn}$  может иметь достаточно большое количество ступеней, эта величина определяется числом ступеней  $\Delta U$  делителя напряжения. В результате преобразования  $N_{xn}$  в двоичный код будет получено  $m$  двоичных разрядов согласно уравнению

$$N_{xn} + 1 = 2^m,$$

откуда

$$m = \frac{\log(N_{xn} + 1)}{\log 2}.$$

Так, например, при  $m = 6$  получим

$$N_{xn} = 2^m - 1 = 63.$$

Это означает, что число ступеней делителя должно быть равно 63.

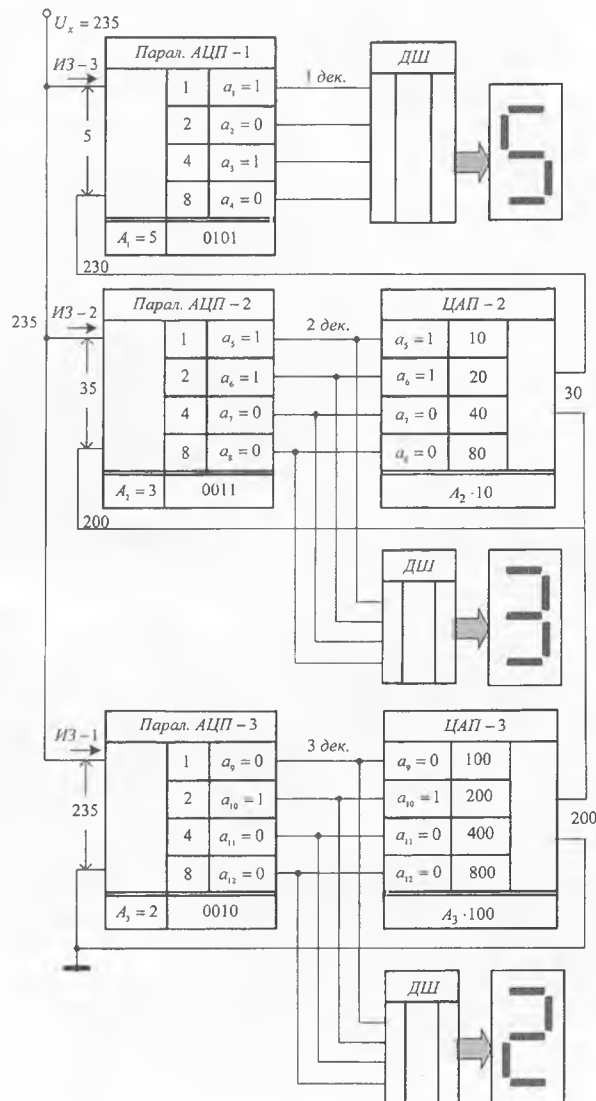


Рис. 9. Параллельно-последовательный цифровой преобразователь напряжения

При усложнении схемы может быть получено свыше десятка тысяч ступеней делителя  $N_{xn}$ . В этом случае число двоичных разрядов достигает значения 14 [4].

Параллельно-последовательный цифровой преобразователь напряжения использует позиционный код более высокого порядка по сравнению с двоичным кодом, то есть троичный... восьмеричный... десятичный и так далее. В этом случае используется базовое число  $P > 2$ .

В качестве примера на рис. 9 показан трехразрядный параллельно-последовательный цифровой преобразователь, использующий десятичный код ( $P=10$ ), на вход которого включено преобразуемое напряжение величиной 235 ед.

В каждом десятичном разряде включен параллельный АЦП с делителем напряжения, который имеет  $P-1=9$  ступеней.

Параллельный АЦП, включенный в каждом разряде, можно рассматривать как многоступенчатый элемент, в отличие от обычно используемых в цифровой технике двоичных элементов. В старшем разряде величину ступени образцової меры примем равную 100 ед. В последующих младших разрядах величина ступени будет соответственно равна 10 и 1 ед.

В процессе измерения формируются три шага преобразования, количество которых равно трем разрядам десятичного позиционного кода.

Уравнение измерения напряжения  $U_x = 235$  ед., согласно (5), можно представить в виде

$$N_x = A_3 \cdot 100 + A_2 \cdot 10 + A_1 = 235, \quad (6)$$

где разрядные коэффициенты в двоичном коде определяются величинами:  $A_3 = 0010$ ;  $A_2 = 0011$ ;  $A_1 = 0101$ .

Двоичные значения разрядных коэффициентов с помощью дешифраторов ДШ преобразуются в десятичную цифру, которая поступает на цифровое отсчетное устройство. В этом случае уравнение (6) можно преобразовать к виду

$$N_x = 2 \cdot 100 + 3 \cdot 10 + 5 = 235 \text{ ед.}$$

Значения  $U_x$  можно представить в двоично-десятичном двенадцатиразрядном коде:

$$N = 0010 \quad 0011 \quad 0101.$$

Этот код будет получен на выходах параллельных АЦП, которые на рис. 9 имеют обозначения АЦП-2, АЦП-3, АЦП-1.

Результат преобразования  $U_x$  будет известен, если определены разрядные коэффициенты  $A_3$ ,  $A_2$ ,  $A_1$ . Рассмотрим процесс получения значений этих величин в процессе цифрового преобразования:

$$N_x = A_3; A_2; A_1 = 235.$$

В першому кроці тактовим імпульсом запуску ИЗ-1 включається паралельний АЦП-3, на виході якого буде отриманий проміжний код, що визначає значення  $A_3$  в двоичному коді:

$$A_3 = \text{Ent} \left\lfloor \frac{U_x}{100} \right\rfloor = \text{Ent} \left\lfloor \frac{235}{100} \right\rfloor = 0010 = 2.$$

Во другому кроці після приходу тактового імпульсу ИЗ-2 з допомогою паралельного АЦП-2 визначається двоичний код некомпенсованої частини перетворюваного напруги  $U_x - A_3 \cdot 100 = 35$ , яка дорівнює двоичному коду розрядного коефіцієнта  $A_2$ :

$$A_2 = \text{Ent} \left\lfloor \frac{U_x - A_3 \cdot 100}{10} \right\rfloor = \text{Ent} \left\lfloor \frac{35}{10} \right\rfloor = 0011 = 3.$$

Значення напруги  $A_3 \cdot 100 = 200$  буде отримано на виході цифро-аналогового перетворювача ЦАП-3 шляхом включення на його вхід двоичного коду коефіцієнта  $A_3 = 0010$ .

В третьому кроці на вхід паралельного АЦП-1 поступає некомпенсована частина перетворюваного напруги  $U_x - A_3 \cdot 100 - A_2 \cdot 10$ , в результаті буде отриманий код коефіцієнта  $A_1$ :

$$A_1 = U_x - A_3 \cdot 100 - A_2 \cdot 10 = 235 - 200 - 30 = 0101 = 5.$$

Напруга  $A_2 \cdot 10 = 30$  визначається аналогічно попередньому з допомогою ЦАП-2.

Послідовність формування кодів в процесі виконання узагальненого алгоритму перетворення представимо в наступному вигляді:

1 шаг	0010 0000 0000	} Промежуточные коды
2 шаг	0010 0011 0000	
3 шаг	0010 0011 0101	} Первичный код
	2 3 5	

Паралельно-последовательный преобразователь пригоден для цифрового преобразования напруги, тому цей прилад слід включити в таблицю узагальненої класифікації під номером 3.3.

#### Список литературы

1. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства / В.Ю. Кончаловский. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 300 с.
2. Аналого-цифровые преобразователи / Э.И. Гитис [и др.]. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
3. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е.М. Душина. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
4. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади / В.М. Чинков. — Харків: НТУ "ХПІ", 2008. — 494 с.
5. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства / В.М. Шляндин. — М.: Высшая школа, 1981. — 622 с.
6. Полулях К.С. К расчету параметров параллельно-последовательных цифровых измерительных приборов / К.С. Полулях, Л.А. Медведева, И.И. Тополов // Вестник национального технического университета "ХПИ". — 2011. — Вып. 11.

УДК 621.3.089

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВНУТРІШНЬОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕРЕХІДНИХ ФУНКЦІЙ ДАВАЧІВ ТИСКУ

А.О. Коваль, аспірант Харківського національного автомобільно-дорожнього університету



*Розглянуто метод внутрішнього контролю параметрів моделі передаточної функції давача. Визначено основні властивості методу. Запропоновано систему корекції параметрів моделі давача.*

*The method of internal control of model parameters of the gauger transfer function is considered.*

*The basic properties of the method are determined. The correction system of the gauge model parameters is offered.*

#### Вступ

**Постановка проблеми.** У процесі експлуатації вимірювальних систем на техногенно-небезпечних об'єктах, таких, як атомні електростанції (АЕС), важливо знати поточні метрологічні характеристики давачів тиску та температури, які використовуються в системах технічної діагностики і автоматичного управління технологічними процесами. Одним із перспективних напрямків постійного бездемонтажного контролю елементів об'єктових вимірювальних систем є онлайн-діагностика, основою якої є постійний збір вимірювальної інформації, її