А К А Д Е М И Я  Н А У К  С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Совет секции технических наук Объединенного ученого
совета по физико-математическим и техническим наукам

На правах рукописи

В.В.ЕФИМЕНКО

# ДВОИЧНО-ДЕСЯТИЧНЫЕ КОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск
1966

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Совет секции технических наук Объединенного ученого совета по физико-математическим и техническим наукам

---

На правах рукописи

В.В.ЕФИМЕНКО

# ДВОИЧНО-ДЕСЯТИЧНЫЕ КОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Автореферат диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Б.В.КАРПЮК

Новосибирск
1966

# В В Е Д Е Н И Е

Быстрое и успешное решение задач комплексной автоматизации производственных процессов и сложных научно-технических экспериментов неразрывно связано с созданием и совершенствованием измерительных информационных систем [I], т.е. систем, осуществляющих сбор, обработку, хранение и выдачу информации, получаемой путем измерений.

В силу известных преимуществ (высокая точность, большое быстродействие, универсальность и др.) в настоящее время большое распространение получили измерительные информационные системы, в которых измерительные операции выполняются с помощью цифраторов x), а обработка, хранение и выдача информации осуществляется в цифровом виде. Такие системы названы [2] цифровыми измерительными.

Основные затруднения, возникающие при построении цифровых измерительных систем, связаны, главным образом, с рациональным выбором и построением цифраторов этих систем. Это объясняется тем, что метрологические характеристики таких систем в основном зависят от качества выполнения измерительных операций, в частности, операций квантования и цифрового кодирования [2-3]. Качество выполнения измерительных операций в значительной степени зависит от выбранного кода, кото-

---

x) В настоящей работе принята терминология, предложенная в [3]. В соответствии с этой терминологией, в частности, цифратором называется устройство, с помощью которого производится квантование и цифровое кодирование, т.е. осуществляется процесс получения числового эквивалента неизвестной величины.

рый также во многом определяет структуру всей измерительной системы.

Задачи, связанные с вопросами кодирования в измерительных системах, отличны от подобных задач, возникающих при построении систем связи и телемеханики. Различия этих задач обусловлены, в основном, следующими причинами:

I. в системах связи и телемеханики сообщение, которое подвергается кодированию, предполагается априори известным, в то время как кодируемая измеряемая величина в измерительных системах является неизвестной;

2. при решении задач, касающихся систем связи и телемеханики, предполагается, что процесс кодирования протекает без помех, и изучается воздействие помех уже на кодированное сообщение, в то время как в измерительных системах главное внимание уделяется изучению помехоустойчивости самого процесса кодирования измеряемой величины;

3. количественные характеристики, оценивающие эффективность кодирования в системах связи и телемеханики, являются недостаточными для оценки процесса кодирования в измерительных системах.

В связи с этим, несмотря на имеющуюся некоторую общность проблем, при проектировании измерительных систем не представляется возможным непосредственно использовать результаты работ по кодированию, выполненных применительно к системам связи и телемеханики, и поэтому возникает необходимость в решении задач кодирования с учетом специфики измерительных систем.

Реферируемая работа посвящена решению некоторых задач, связанных с двоично-десятичным кодированием в цифровых измерительных системах, которое в силу известных преимуществ получило наиболее широкое распространение в таких системах.

Двоично-десятичное кодирование осуществляется путем сопоставления каждой десятичной цифре некоторого набора двоичных цифр. Так как минимальное количество двоичных цифр, с помощью которых можно получить десять различных двоичных чисел, равно четырем, то для представления каждой десятичной цифры требуется не менее чем четыре двоичных цифры (тетрада). Комбинируя различные способы сопоставления десятичных цифр и тетрад, можно получить $\frac{16!}{6!} \approx 2{,}9 \cdot 10^{10}$ [6] двоично-десятичных кодов x).



Несмотря на значительное количество работ [4-I4 и др.], посвященных двоично-десятичным кодам, эти коды изучены недостаточно, в особенности применительно к измерительным системам.

При исследовании двоично-десятичных кодов, применяемых в измерительных системах, возникает ряд задач.

Это, во-первых, задачи, связанные с анализом и синтезом двоично-десятичных кодов, обеспечивающих простоту технической реализации цифраторов и уменьшающих их погрешность: математическое описание кодов, определение их числа и разработка синтеза кодов с заданными свойствами.

Во-вторых, это задачи, связанные с согласованием статистических характеристик измеряемой величины и кода с целью получения максимального быстродействия измерительных систем. В частности, к этим задачам относятся задачи выбора кодов, обеспечивающих максимальное быстродействие цифраторов уравновешивания.

В-третьих, сюда же относятся задачи анализа помехоустойчивости двоично-десятичных кодов и отыскание новых, более помехоустойчивых способов двоично-десятичного кодирования измеряемой величины.

Вопросы, связанные с решением перечисленных задач, составляют основное содержание данной диссертационной работы. Работа состоит из трех глав и одного приложения.

x) Здесь и далее под двоично-десятичным кодом будем понимать систему однозначных соответствий между десятичными цифрами и двоичными тетрадами.

# Г Л А В А I.

## Двоично-десятичные коды, обеспечивающие простоту технической реализации цифраторов и уменьшающие их погрешность

К основным требованиям, предъявляемым к двоично-десятичным кодам при их применении в цифраторах измерительных систем, в частности, можно отнести следующие:

I. Обеспечение минимальной ошибки измерения.

2. Простота технической реализации цифратора и измерительной системы в целом.

В цифраторах совпадения выполнение первого требования обеспечивают двоично-десятичные коды с единичным расстоянием (в общем случае, квазиэквидистантные коды с расстоянием $d_c$). Второе требование наиболее полно выполняется при использовании двоично-десятичных кодов Липпела, а также кодов, обладающих свойством дополнительности. Оба эти требования выполняются для дополнительных квазиэквидистантных кодов и для квазиэквидистантных кодов Липпела.

В цифраторах уравновешивания указанным требованиям удовлетворяют взвешенные коды с целочисленными и дробными весами, а также взвешенные дополнительные коды.

Очевидно, если в измерительной системе используются оба типа цифраторов, то в этом случае в системе целесообразно применять коды, обладающие всеми свойствами перечисленных выше двоично-десятичных кодов.

Таким образом, наибольший практический интерес представляет изучение следующих двоично-десятичных кодов: квазиэквидистантных кодов, дополнительных кодов, кодов Липпела, взвешенных кодов, а также кодов, обладающих свойствами, характерными для нескольких из перечисленных кодов, например, квазиэквидистантные дополнительные коды, взвешенные дополнительные коды и т.п.

Под квазиэквидистантными двоично-десятичными кодами понимаются коды, в которых изображениями соседних десятичных цифр являются кодовые комбинации, которые в пространстве с метрикой



по Хеммингу соответствуют координатам вершин гиперкуба, находящихся на одинаковых расстояниях друг от друга. В работе показано, что такие коды можно описать следующей системой равенств:

$$
\begin{aligned}
B_0 \oplus B_1 &= C_1 \\
B_1 \oplus B_2 &= C_2 \\
&\cdots\cdots\cdots \\
B_i \oplus B_{i+1} &= C_j \\
&\cdots\cdots\cdots \\
B_8 \oplus B_9 &= C_9 \\
B_9 \oplus B_0 &= C_{10}
\end{aligned}
\qquad (I)
$$

причем

$$B_i \neq B_K \quad i \neq K \qquad i, K = 0, I, 2, \ldots, 9$$

$$\|C_j\| = d_c \qquad j = I, 2, 3, \ldots, I0$$

Здесь

$B_i$ – кодовая комбинация, изображающая десятичную цифру $i$.

$\oplus$ – знак суммирования по $\mathrm{mod}\,2$,

$C_j$ – кодовая комбинация, которая является результатом суммы по $\mathrm{mod}\,2$ двух кодовых комбинаций, изображающих две соседние десятичные цифры.

$\|C_j\|$ – норма $C_j$

$d_c$ – значение нормы для $C_j$

Величина $d_c$ является характеристикой квазиэквидистантного кода. В работе доказывается теорема, показывающая, что среди класса четырехзначных двоично-десятичных кодов, кроме известных квазиэквидистантных кодов с $d_c = I$, существуют квазиэквидистантные коды только с $d_c = 3$. В ходе доказательства теоремы предложен новый метод синтеза квазиэквидистантных кодов с $d_c = I$ и $d_c = 3$. Показано, что комбинации (двоичные числа) $C_j$ в системе равенств (I) в совокупности можно рассматривать как некоторую последовательность $\{C_j\}$, составленную из двоичных чисел $e_s$ ($s = I, 2, 3, 4$), принадлежащих набору чисел ( 000I, 00I0, 0I00) при $d_c = I$ или набору чисел (III0, II0I, I0II, 0III) при $d_c = 3$ и удовлетворяющую условиям:

$$\oplus \sum_{j=1}^{10} C_j = 0, \qquad \oplus \sum_{j=1}^{j+\ell-10\eta} C_j \neq 0 \qquad (2)$$

где

$j = 1,2,3,\ldots,10,$ $\quad\quad$ $l = 1,3,5,7,$

$$\eta = \begin{cases} 0 & j + l \leq 10 \\ 1 & j + l > 10 \end{cases}$$

Доказано, что существует всего 4 х 720 различных последовательностей $\{C_j\}$, удовлетворяющих условиям (2). Поскольку при данной правой части из системы (I) можно получить I6 различных квазиэквидистантных кодов, а в качестве правой части системы (I) может быть взята любая из указанных выше последовательностей $\{C_j\}$, то отсюда вытекает, что существует 4 х I6 х 720 различных квазиэквидистантных кодов с $d_c = 1$ или $d_c = 3$. Приводится методика синтеза квазиэквидистантных кодов, обладающих минимальной избыточностью, с $d_c > 3$. Доказано также, что коды с четным значением $d_c$ существуют только среди класса $n$ -значных двоично-десятичных кодов при $n \geq 5$.

В работе определяется дополнительный двоично-десятичный код, как код, для которого справедливо следующее:

$$B_p \oplus B_q = C \neq Const, \quad p + q = S \tag{3}$$

для $S = 9$ или $S = 10$ и $p = 0,1,2,3,\ldots,9$,

где $B_p$, $B_q$ - двоичные числа, изображающие десятичные числа $p$ и $q$ соответственно.

$C$ - любое четырехразрядное (для класса четырехзначных кодов) двоичное число, кроме нуля.

Приводится метод синтеза этих кодов и показывается, что общее число дополнительных двоично-десятичных кодов равно 80 х 8! Среди дополнительных двоично-десятичных кодов существуют квазиэквидистантные коды. Дополнительные квазиэквидистантные коды также описываются системой (I) при добавочном условии, что $\|C\| = d_c$, $C_9 = C_{10} = C$, $C_1 = C_5$, $C_2 = C_3$, $C_3 = C_7$, $C_4 = C_6$ . Найдено, что среди класса четырехзначных кодов всего существует I6 х 48 дополнительных квазиэквидистантных кодов с $d_c = 1$ и столько же - с $d_c = 3$.

При изучении двоично-десятичных кодов Липпела наибольшее внимание уделяется квазиэквидистантным кодам Липпела. Указывается на возможность использования системы равенств (I) для получения квазиэквидистантных кодов Липпела с $d_c = 1$. При этом



необходимо, чтобы члены последовательности $\{C_j\}$ удовлетворяли неравенству

$$\Big\| \bigoplus \sum_{\substack{j=2m+1 \\ m=0,1,2,3,4}} C_j \Big\| \geq 3$$

В работе показано, что существует не менее чем I6 х 24 х I0 квазиэквидистантных кодов Липпела с $d_c = 1$. Это является уточнением оценки количества этих кодов, ранее полученной Топкинсом в [13]. Доказана также теорема о том, что не существует квазиэквидистантных кодов Липпела с $d_c = 3$.

Двоично-десятичные коды называются взвешенными, если в этих кодах для двоичных разрядов существуют такие рациональные числа $a_l$, что

$$x = \sum_{l=1}^{4} \gamma_l a_l ,$$

где $x$ может принимать значения 0,I,2,...,9 ;

$\gamma_l$ - двоичные переменные;

$a_l$ - постоянные весовые коэффициенты.

В работе доказывается пять теорем, раскрывающих некоторые свойства взвешенных четырехзначных двоично-десятичных кодов с целочисленными весами. В первой теореме утверждается, что среди этого класса взвешенных кодов существует только I7 различных наборов со всеми положительными весовыми коэффициентами, 54 набора с одним отрицательным и I7 наборов с двумя отрицательными весовыми коэффициентами. В ходе доказательства этой теоремы, кроме известных ранее наборов весовых коэффициентов [6], получены новые. Это следующие наборы:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 543 - 6 | 763 - 5 | 84I - 6 | 83 - 4 - 2 |
| 543 - 3 | 852 - 4 | 75 - 3 - I | 82 - 4 - I |
| 654 - 3 | 843 - 6 | 73 - 2 - I | 8I - 4 - 2 |
| 653 - 7 | 842 - 5 | 84 - 4 - I | |
| 65I - 3 | 74I - 2 | 85 - 4 - 2 | |

Каждый набор весовых коэффициентов позволяет сформировать $N_1$ различных взвешенных двоично-десятичных кодов, причем

$$N_1 = \frac{24 \prod_i z_i}{k!} \tag{4}$$

где $\tau_i$ – число возможных способов формирования десятичного числа $i$ ( $i = 0,1,2,...9$) при данном наборе весов;

$k$ – число одинаковых весовых коэффициентов в наборе.

Получено, что число всех взвешенных двоично-десятичных кодов с целочисленными весовыми коэффициентами равно 14664.

Во второй теореме x) доказывается, что существует только 24 набора весовых коэффициентов, которые позволяют образовывать дополнительные коды при $S = 9$ и 9 наборов весовых коэффициентов, позволяющих образовывать дополнительные коды при $S = 10$. Из этой теоремы как следствие вытекает, что не существует взвешенных двоично-десятичных кодов, которые обладают свойством дополнительности при $C \neq 1111$, и, кроме того, то, что между некоторыми кодами с положительными весами и некоторыми кодами с двумя отрицательными весами имеется зависимость, подобная свойству дополнительности, которая позволяет сравнительно легко осуществлять переход от изображения информации в одном коде к изображению этой же информации в другом коде. Третья и четвертая теоремы указывают на связь взвешенных кодов с квазиэквидистантными кодами и кодами Липпела. В них доказывается, что среди взвешенных кодов не существует ни квазиэквидистантных кодов, ни кодов Липпела, и, наконец, пятая теорема показывает, что среди всех наборов весовых коэффициентов существует только два набора (7421 и 6321) весовых коэффициентов, позволяющих образовать коды, для которых $\|B_i\| \leq 2$ при всех значениях $i = 0,1,2,...,9$. Эта теорема является обобщением результатов, полученных в [10] , на случай кодов с отрицательными весами.

Рассматриваются двоично-десятичные коды, весовые коэффициенты которых являются дробными числами. Эти коды образуются от обычных взвешенных двоично-десятичных кодов путем вычитания от их весов некоторых чисел $\alpha$. Значения этих чисел лежат в интервале $(0,1)$.

---

x) Теорема, доказанная в [7], является частным случаем этой теоремы при $S = 9$ и $a_i > 0$.



Коды с дробными весами можно использовать в самых младших декадах цифраторов уравновешивания. При этом функция плотности вероятности ошибки квантования по всем точкам шкалы $F(\Delta_x)$ полностью определяется выбором значений $\alpha$. Синтез этих кодов сводится к выбору значений $\alpha$, обеспечивающих заданный вид функции $F(\Delta_x)$ при условии, что значение $|\Delta_x|_{max} < 1$. Требования к виду $F(\Delta_x)$ обычно задаются в виде ограничений на значения таких числовых характеристик, как первый абсолютный момент $M[|\Delta_x|]$, математическое ожидание $M[\Delta_x]$ и дисперсия ошибки квантования $D[\Delta_x]$. Для цифраторов в этом случае наибольший интерес представляет синтез кодов, обеспечивающих минимум значения $M[|\Delta_x|]$ или $M[\Delta_x]$ при условии, что $|\Delta_x|_{max} < 1$. Показано, что синтез кодов, обеспечивающих минимум $M[|\Delta_x|]$, сводится к решению задачи квадратичного программирования, а синтез кодов, дающих минимум $M[\Delta_x]$ – к решению задачи линейного программирования. Приводится решение этих задач для кодов с дробными весами, образованных двадцатью взвешенными кодами, которые могут использоваться в цифраторах поразрядного уравновешивания.

## ГЛАВА 2

### Двоично-десятичные коды, обеспечивающие максимальное быстродействие цифраторов

Показывается, что если в цифраторе поразрядного уравновешивания кодирование производить с неравномерным циклом, то это дает возможность повысить среднее быстродействие цифратора. В этом случае быстродействие цифратора зависит от используемого двоично-десятичного кода и закона распределения измеряемой величины, причем для данного закона распределения измеряемой величины существует код, при котором быстродействие данного цифратора оказывается максимальным.

Двоично-десятичный код, который позволяет производить измерение за минимальное количество сравнений неизвестной величины с известной, называется оптимальным по быстродействию. При такой оценке оптимальности кода для цифраторов уравновешивания задача нахождения двоично-десятичного кода, оптимального по быстродействию, адэкватна задаче оптимального статистического кодирования в системах связи.

Следуя шенноновской теории оптимального кодирования, можно показать, что для цифраторов уравновешивания справедливо неравенство

$$N \geqslant \frac{I_u}{I_{cp.}}, \qquad (5),$$

где $N$ – среднее количество необходимых сравнений для проведения измерения;

$I_u$ – среднее количество информации, получаемое в процессе измерения;

$I_{cp.}$ – среднее количество информации, получаемое в результате одного сравнения неизвестной величины с известной.

Так как для данного распределения измеряемой величины и данной погрешности дискретности $I_u = Const$, то, очевидно, при $I_{cp.} \to I_{cp.}^{max}$, $N \to N_{min}$. Другими словами, в случае оптимального кода значение величины $I_{cp.}$ максимально. На основе этого для цифраторов уравновешивания предлагается методика нахождения оптимального кода при заданном законе распределения измеряемой величины.

Согласно этой методике для данного цифратора, зная плотность вероятности распределения измеряемой величины, по (5) необходимо найти значение $N_{min}$, а затем, также с учетом заданного закона распределения измеряемой величины нужно, определить среднее число необходимых сравнений $\bar{N}$, которое требуется для измерения при использовании каждого из известных двоично-десятичных кодов, и, наконец, путем сопоставлений значений чисел $\bar{N}$ с $N_{min}$ непосредственно находится оптимальный код.

При равномерном и нормальном законах распределения измеряемой величины оптимальные по быстродействию коды найдены для всех наиболее распространенных типов цифраторов уравновешивания: для цифраторов с двоичным устройством сравнения, для цифраторов с троичным устройством сравнения и для двухканальных цифраторов с двоичными устройствами сравнения. Показано, что для цифраторов уравновешивания, в которых используются двоичные сравнивающие устройства, при равномерном законе распределения измеряемой величины оптимальными по быстродействию являются двоично-десятичные коды: 52II, 442I, 642I, 532I, 522I, 622I, 422I, 53II. В случае нормального закона распределения измеряемой величины оптимальными являются двоично-десятичные коды 642I и 442I.

Использование в цифраторах с двоичным устройством сравнения двоично-десятичных кодов, оптимальных по быстродействию, дает возможность, в худшем случае (т.е. при наибольшей априорной неопределенности измеряемой величины) на 15% повысить среднее быстродействие этих цифраторов.

Выбор кода, оптимального по быстродействию, при использовании в цифраторах уравновешивания троичных сравнивающих устройств зависит от того, со сколькими значениями известной величины одновременно сравнивается неизвестная величина, т.е. от количества кодовых каналов в цифраторе.

В работе показывается, что в цифраторе с одним кодовым каналом наиболее целесообразно использовать троичное сравнивающее устройство, если цифратор малодекадный. При этом для цифраторов уравновешивания с одним кодовым каналом, использующих троичные сравнивающие устройства, с точки зрения быстродействия для всех декад, исключая самую младшую, оптимальными являются те же двоично-десятичные коды, которые являются оптимальными для этих условий в случае использования двоичного сравнивающего устройства. Для самой младшей декады оптимальными в указанном смысле являются только коды: 422I, 442I,

На основе анализа процесса двоично-десятичного кодирования в цифраторе с одним кодовым каналом, использующем троичное сравнивающее устройство, вытекает, что с целью более эффективного использования функциональных возможностей троичного сравнивающего устройства, кодирование в цифраторе необходимо проводить параллельно по двум кодовым каналам.

При кодировании по двум каналам в случае равномерного распределения измеряемой величины с точки зрения получения максимального быстродействия в одном канале целесообразно использовать код 332I, а в другом - 63II. В этом случае быстродействие повышается почти на 37% по сравнению с быстродействием одноканального цифратора с неравномерным циклом кодирования.

Кроме выбора кода в зависимости от закона распределения измеряемой величины, в работе рассмотрена задача выбора кода, который обеспечивает измерение неизвестной величины за минимальное число сравнений при наиболее простой схеме технической реализации неравномерного цикла кодирования.

Практически, принцип кодирования с неравномерным циклом сравнительно легко реализуем в цифраторах. Для этого необходимо работу устройства управления организовать так, чтобы после сравнения неизвестной величины с известной величиной, начиная со старшего разряда, необходимость этой операции для последующих разрядов определялась результатом предыдущих сравнений.

Техническая реализация неравномерного цикла кодирования в цифраторах поразрядного уравновешивания оказывается наиболее простой, если в качестве устройства управления использовать схему на основе однотактного феррит-диодного регистра сдвига.

При этом показано, что с точки зрения простоты реализации неравномерного цикла кодирования в цифраторах для всех декад, исключая самую старшую, лучшими являются коды 422I, 52II, 53II, 622I. Но еще более просто получается реализация неравномерного цикла в цифраторе с программным уравновешиванием. В работе предлагается один из возможных путей построения такого цифратора.

Как указывалось выше, если в цифраторе используется троичное сравнивающее устройство, то с целью получения максимального



ного быстродействия такого цифратора и наиболее эффективного использования функциональных возможностей сравнивающего устройства, уравновешивание в этих цифраторах целесообразно производить по двум взаимосвязанным кодовым каналам. В работе предлагается принципиальная схема цифратора, в котором осуществляется уравновешивание по двум взаимосвязанным кодовым каналам.

Показывается, что двухканальные цифраторы, с одной стороны, обладают почти в два раза большим быстродействием, чем обычные цифраторы, и, с другой стороны, конструктивно эти цифраторы ненамного сложнее обычных цифраторов поразрядного уравновешивания. Эти цифраторы сравнимы по быстродействию с цифраторами, предложенными В.М.Шляндиным, в которых принцип совпадения сочетается с принципом уравновешивания, но при этом двухканальные цифраторы проще по структуре.

## Г Л А В А 3

### Исследование помехоустойчивости двоично-десятичных кодов

Несмотря на то, что вопросы, связанные с анализом помехоустойчивости двоично-десятичных кодов уже рассматривались в [5,8] , но изучены они еще неполно. В [5] помехоустойчивость этих кодов рассматривалась лишь на качественном уровне, а в [8] хотя и производилась количественная оценка помехоустойчивости, однако выбранная при этом количественная мера помехоустойчивости является недостаточной для оценки помехоустойчивости кода, применяемого в измерительной системе, так как при измерении важным является не только факт несоответствия результата кодирования действительному значению измеряемой величины, а и степень этого несоответствия.

Представляется целесообразным в качестве количественной меры помехоустойчивости применять такую характеристику, которая одновременно учитывала бы степень несоответствия результата кодирования действительному значению измеряемой величины и вероятность появления этого несоответствия.

Степень несоответствия может быть охарактеризована величиной разности значений результата кодирования в отсутствие помех и результата кодирования при воздействии помех.

Обозначив степень несоответствия через $\Delta$, результат кодирования в отсутствие помех через $X$, а результат кодирования при воздействии помехи величиной $У$ через $X(У)$, можем записать

$$\Delta = X - X(У). \qquad (6)$$

Очевидно, что величина $\Delta$ зависит от типа кода, значения измеряемой величины $X$ и помехи $У$.

Поскольку отдельные значения измеряемой величины $X$ и помехи $У$ являются случайными, то величина $\Delta$ также является случайной. При данных законах распределения измеряемой величины и помехи закон распределения величины $\Delta$ определяется только типом кода.

Вследствие того, что числовые характеристики закона распределения величины $\Delta$ являются теми характеристиками, которые учитывают степень несоответствия и вероятность его появления, то они могут быть использованы в качестве количественной меры помехоустойчивости.

Выбор той или иной числовой характеристики (или целой совокупности некоторых числовых характеристик) в качестве количественной меры помехоустойчивости определяется конкретными условиями использования цифровой измерительной системы.

В данной работе помехоустойчивость двоично-десятичных кодов изучается на модели однодекадного цифратора уравновешивания, для которого результат кодирования $x_i$ -го значения измеряемой величины при использовании двоично-десятичного кода с весами $a_1$, $a_2$, $a_3$, $a_4$ можно записать в виде [5]:

$$x_i = \sum_{\ell=1}^{4} \gamma_\ell a_\ell \qquad (7),$$



где

$$\gamma_\ell = \begin{cases} 0 & X \le \sum_k a_k \gamma_k + a_\ell \\ I & X > \sum a_k \gamma_k + a_\ell \end{cases} \qquad (8)$$

$$k = I, 2, \ldots, \ell - I$$

Так как здесь рассматриваются целочисленные значения $x_i$ ($x_i = 0, I, 2, \ldots, 9$), то, очевидно, при отсутствии помех $x_i = x_i(\gamma)$.

Соотношение (8) в отсутствии помех полностью определяет то соответствие, которое устанавливается в данном цифраторе между целочисленными значениями $x_i$ и двоичными тетрадами, т.е. однозначно определяет двоично-десятичный код.

Однако при воздействии помех может возникнуть такая ситуация, когда соотношение (8) не выполняется, а соотношение (7) при этом может либо выполняться, либо нет. Очевидно для получения правильного результата измерений достаточно выполнение (7). Невыполнение при этом (8) означает, что измеряемая величина закодирована в другом двоично-десятичном коде.

Показывается, что, не зная априори свойств помех и их закона распределения, нельзя дать никаких рекомендаций по использованию результатов измерений, закодированных в другом коде.

Поэтому при анализе помехоустойчивости предполагается, что цифратор может работать в двух режимах работы:

а) используются только двоичные комбинации, при наборе которых удовлетворяется соотношение (8), а при наборе других комбинаций, принадлежащих к другим кодам, измерение повторяется, т.е. избыточность используется для целей обнаружения ошибки;

б) используются все комбинации, за исключением тех только, которые не принадлежат ни к какому коду, т.е. те, для которых $x_i(\gamma) > 9$.

В качестве количественной меры помехоустойчивости используются величины $M[|\Delta|]$, $M[\Delta]$, $D[\Delta]$, а также такие, как вероятность получения правильного результата измерений $P_{пр.}$, вероятность получения ошибочного результата измерений, который можно обнаружить $P_{об.}$ и вероятность получения ошибочного результата измерений $P_{ош.}$. Эти характеристики для модели цифратора уравновешивания определяются при воздействии помех двух видов:

I. импульсные помехи различной амплитуды и полярности, но малой интенсивности (одиночные помехи);

2. импульсные помехи, вызывающие сбои, вероятности которых распределены по биномиальному закону ( амплитуда помехи не ограничивается).

Анализ полученных данных показывает, что для разных критериев оценки помехоустойчивости даже при одинаковых законах (не говоря уже о разных законах) распределения измеряемой величины и помехи существуют различные коды, оптимальные в смысле помехоустойчивости. Это свидетельствует о том, что, не зная целей измерения и условий его проведения (т.е.распределений измеряемой величины и помехи), нельзя указать наиболее помехоустойчивый код. Поэтому в каждом конкретном случае для определения кода, оптимального в смысле помехоустойчивости, необходимо вычислять значения принятых критериев помехоустойчивости.

Для случая малых импульсных одиночных помех рекомендуется просчитывать эти критерии для заданного закона распределения помех. Для этой цели в работе найдены для различных кодов значения величины $\Delta$ при различных значениях измеряемой величины и помехи. Они приводятся в приложении I. Это позволяет при известных законах распределения измеряемой величины и помехи сравнительно легко найти указанные характеристики помехоустойчивости.

В тех случаях, когда известно, что помехи приводят к сбоям, вероятности которых распределены по биномиальному закону, причем амплитуда помехи также является случайной величиной, предлагается вычислять значения $M[|\Delta|]$, $M[\Delta]$, $D[\Delta]$, $P_{пр.}$, $P_{об.}$, $P_{ош.}$, используя вычислительную машину. Для вычисления этих характеристик составлена специальная программа.

Расчет характеристик помехоустойчивости при различных законах распределения измеряемой величины и помехи показывает, что двоично-десятичные коды обладают сравнительно низкой по-



мехоустойчивостью. Они зачастую не обеспечивают заданной точности проведения операции цифрового кодирования в измерительных системах. Поэтому возникает задача отыскания новых методов двоично-десятичного кодирования, обладающих более высокой помехоустойчивостью.

В работе предлагаются следующие новые методы увеличения помехоустойчивости:

применение в цифраторах шестизначного двоично-десятичного кода с обнаружением одиночных ошибок;

использование кодирования по двум каналам для коррекции одиночных ошибок.

Шестизначный двоично-десятичный код с обнаружением одиночных ошибок образуется от любого обычного четырехзначного взвешенного кода путем добавления двух проверочных разрядов с весами "0" и "I". Информацией о наличии ошибки является набор в проверочных разрядах комбинации, отличной от I0. Примерами таких кодов могут быть коды 332I0I, 63II0I, 52II0I и т.д. Использование таких шестизначных кодов в цифраторах позволяет обнаружить все одиночные сбои двоичных разрядов, 40% двойных сбоев, 20% тройных и 25% сбоев в четырех разрядах декады. Эти коды позволяют осуществлять в цифраторах коррекцию ошибок.

Способ коррекции заключается в том, что в цифраторе с двумя кодовыми каналами предлагается использовать коды с обнаружением ошибок, множества рабочих комбинаций которых не пересекаются (например, 332I0I и 63II0I), и, кроме того, вводить специальные цепи связи между всеми одинаковыми декадами двух кодовых каналов. В исходном состоянии цепи связи должны быть разомкнутыми и замыкание той или иной связи производится в зависимости от того, в каком из каналов набралась правильная комбинация. Если при уравновешивании в декаде канала I набралась правильная комбинация, а в декаде канала II - неправильная, то замыкается цепь связи I канала со вторым каналом, где в результате этого набирается комбинация, эквивалентная комбинации, набранной в канале I. В условиях действия импульсных помех малой длительности такой способ позволяет исправить почти все одиночные ошибки (сбои), а также обнаружить большую часть многократных сбоев.

В работе предлагается схема цифратора, реализующего указанный способ коррекции. Основным достоинством этой схемы является её простота: реализация предлагаемого способа коррекции осуществляется путем удвоения лишь одной декады. На основе анализа двоично-десятичных кодов найдены коды с обнаружением одиночных ошибок, которые наиболее целесообразно использовать в цифраторах с коррекцией ошибок. Такими кодами являются коды 63II0I и 332II0.

Проведенная в работе количественная сравнительная оценка известных способов [8,9] повышения помехоустойчивости двоично-десятичного кодирования измеряемой величины с предлагаемыми доказывает преимущества последних.

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему:

I. Изучен новый класс двоично-десятичных кодов - квазиэквидистантные коды. Дано математическое описание этих кодов и указан метод их синтеза, позволяющий получить все квазиэквидистантные коды с заданным значением $d_c$.

2. Дано математическое описание дополнительных двоично-десятичных кодов, найдено их количество, изучена связь этих кодов с квазиэквидистантными кодами.

3. Дано математическое описание квазиэквидистантных кодов Липпела. Получена новая оценка их количества. Предложен новый метод их синтеза.

4. Определено количество взвешенных кодов, а также синтезированы эти коды, рассмотрена связь их с другими кодами.

5. Предложен новый класс двоично-десятичных кодов с дробными весами. Синтезированы коды с дробными весами, позволяющие осуществлять процедуру квантования, близкую к оптимальной.

6. Предложена методика выбора кодов, обеспечивающих максимальное быстродействие цифраторов уравновешивания. Эта методика основана на использовании статистических характеристик



кода и измеряемой величины.

7. Исследовано быстродействие цифраторов уравновешивания с двоичными сравнивающими устройствами и найдены двоично-десятичные коды, обеспечивающие максимальное быстродействие таких цифраторов.

8. Показана возможность повышения быстродействия цифраторов уравновешивания при использовании троичных сравнивающих устройств и двух каналов уравновешивания. Дана оценка быстродействия и получены оптимальные (в смысле быстродействия) коды для этих цифраторов.

9. Проведен анализ помехоустойчивости кодов при различных критериях оценки и различных законах распределения измеряемой величины и помехи. Разработана методика выбора двоично-десятичного кода, оптимального по помехоустойчивости при заданных законах распределения измеряемой величины и помехи.

I0. Проведен анализ методов повышения помехоустойчивости двоично-десятичных кодов и рассмотрены способы построения избыточных двоично-десятичных кодов с обнаружением ошибок.

II. Предложен новый способ коррекции ошибок двоично-десятичного кодирования и найдены коды, которые наиболее целесообразно использовать в цифраторах с коррекцией ошибок.

I2. В результате теоретических исследований двоично-десятичных кодов даны рекомендации по построению цифраторов в измерительных системах и предложен ряд новых схем цифраторов:

а) схема цифратора поразрядного уравновешивания и схема цифратора программного уравновешивания, которые обеспечивают простоту технической реализации и повышение быстродействия цифраторов с неравномерным циклом кодирования;

б) схема двухканального цифратора, быстродействие которого примерно в два раза выше быстродействия известных цифраторов поразрядного уравновешивания;

в) схема цифратора с обнаружением и исправлением ошибок. Эта схема позволяет обнаруживать и исправлять все одиночные ошибки (сбои), а также обнаруживать большую часть многократных сбоев.

Основные материалы диссертации докладывались на Всесоюзных конференциях по автоматическому контролю и методам электрических измерений в г.Новосибирске в 1963, 1964 и 1965 гг., а также на конференции молодых ученых и специалистов г.Новосибирска в январе 1966 года.

Кроме того они изложены в следующих работах:


1. Е ф и м е н к о В. В. Выбор двоично-десятичного кода в приборах поразрядного уравновешивания. Труды У конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений, т.I.,изд. "Наука" СО АН СССР, Новосибирск, 1965.
2. Е ф и м е н к о В. В. О помехоустойчивости двоично-десятичных кодов. Автометрия № 2, 1965.
3. Г о р е л и к о в Н. И., Е ф и м е н к о В. В., К о р ш е в е р И. И. О цифровых приборах поразрядного уравновешивания с неравномерным циклом кодирования. Автометрия, № 3, 1965.
4. Е ф и м е н к о В. В. Выбор двоично-десятичного кода для автоматических цифровых измерительных приборов (АЦИП) с троичным устройством сравнения, Автометрия № 5, 1965.
5. Е ф и м е н к о В. В. Шестизначные двоично-десятичные коды с обнаружением одиночных ошибок, Автометрия № 5, 1965.

[redacted]

6. Е ф и м е н к о В. В. Способ обнаружения неправильных результатов измерений. Авторское свидетельство № 175564, Бюллетень изобретений и товарных знаков № 20, 1965.
7. Е ф и м е н к о В. В. Об использовании двоично-десятичных кодов с дробными весами в цифровых измерительных приборах. Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1965.
8. Е ф и м е н к о В. В. Некоторые результаты исследования двоично-десятичных кодов с целью их оптимального использования в цифровых измерительных системах. Конференция молодых ученых и специалистов. Секция "Автометрия, автоматическое управление и вычислительная техника". Тезисы докладов и сообщений, г.Новосибирск, 1966.
9. Г о р е л и к о в Н. И., Е ф и м е н к о В. В. Цифровой измерительный прибор. Авторское свидетельство по заявке № 1007622 (Решение о выдаче от 31/I-1966 г.).

## ЛИТЕРАТУРА


I. К а р а н д е е в К. Б. Измерительные информационные системы и автоматика. Вестник АН СССР № IO, I96I.

2. Ц а п е н к о М. П. Создание и исследование автоматических измерительных систем и их элементов. Авторский доклад по работам, представленным на соискание ученой степени доктора технических наук, СО АН СССР, Новосибирск, I963.

3. Ц а п е н к о М. П. О классификации цифровых измерительных приборов. Измерительная техника № 5, I96I.

4. Г и т и с Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. ГЭИ, М-Л., I96I.

5. Н е т р е б е н к о К. А. Цифровые автоматические компенсаторы. ГЭИ, М-Л., I96I.

6. Р и ч а р д с Р. К. Арифметические операции на цифровых вычислительных машинах. ИИЛ, М., I957.

7. П о с п е л о в Д. А. О числе удобных для вычислительных машин двоично-десятичных кодов с положительными весами. Известия вузов "Приборостроение", т.5, № I, I962.

8. В о л г и н Л. И. О выборе оптимальной системы кодирования чисел в цифровых вольтметрах с кодоимпульсным преобразованием. Цифровая электроизмерительная техника, вып. 9, ОНТИПрибор, I964.

9. В о л г и н Л. И. Цифровой вольтметр с двумя кодовыми каналами. Кибернетические пути совершенствования методов измерения и контроля. Тезисы докладов, Л., I964.

IO. М у т т е р В. М., М у т т е р М. А., Р о м а н о в с к и й В. Р. К выбору кода звездообразного делителя напряжения. Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений, Новосибирск, I965.

11. W n i t e G. Coded decimal number system for digital computurs. Proceedings of the IRE 1953, v.41 N 10.





12. L i p p e l B.A. A decimal code for analog-to-digital conversion. IRE Trans on Electronic Computers, 1955 v. EC-4, N 4.

13. T o m p k i n s H.E. Unit-Distance Binary-Decimal Coder for Two-Track-Commutation. IRE Trans on Electronic computers. v.EC-5, 1956.

14. O'B r i e n e J.A. Cyclic decimal code for analogue to digital converters. Commun. and Electronics, 1956, 24.



Технический редактор Л.А. Панина

Подписано к печати 4.У-I966 г. МН0307I
Бумага 60х90/I6. Печ. л. I.5. Уч.-изд.л. I,35.
Тираж 2I0. Заказ I25.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.