

## ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.142.01

И. Т. АБРАМСОН,  
Л. Я. ЛАПКИН, О. В. НОСИКОВ  
(Ленинград)

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ, РАБОТАЮЩИХ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ\*

В настоящее время в различных областях науки и техники широко используются цифровые методы обработки информации. В связи с этим перед разработчиками ставится задача создания быстродействующих, высоконадежных и гарантирующих достоверную работу систем обработки информации. Одним из путей решения этой задачи является построение цифровых систем обработки информации, работающих в системе счисления остаточных классов (СОК). Распространение цифровых систем, работающих в СОК, существенно зависит от решения задачи их высоконадежной связи с внешними устройствами.

В работе обсуждается один из вопросов этой проблемы — построение аналого-цифровых преобразователей, работающих непосредственно в СОК без промежуточного преобразования в позиционную систему счисления. Это позволяет уменьшить общее время преобразования и сохранить однородность свойств кодов в СОК на всем тракте преобразования информации.

Система счисления остаточных классов является непозиционной системой, в которой каждый разряд числа независим от остальных и имеет свое основание, называемое модулем. В основе построения СОК лежит раздел теории чисел, относящийся к сравнениям [1].

Система модулей в СОК представляет собой ряд целых взаимно простых положительных чисел  $p_i$ , где  $i=1, 2, \dots, n$ . Набор модулей  $p_i$  дает возможность однозначно представить числа в диапазоне

$$P = \prod_{i=1}^n p_i,$$

называемом интервалом определения чисел (ИО). Число  $A$  в СОК записывается в виде

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n), \quad (1)$$

где  $\alpha_i = \{A\}_{p_i}$  — наименьший положительный остаток (вычет), обра-

\* Материал доложен на IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1968 года в Новосибирске.

зующийся при делении числа  $A$  на модуль  $p_i$ . Кодовая запись числа  $A$  в виде (1) может быть названа кодом вычетов числа  $A$  по модулям  $p_i$ .

Преобразование кода, выраженного в СОК, в напряжение можно производить с помощью промежуточного перевода числа из СОК в позиционную двоичную систему счисления с дальнейшим использованием обычных двоичных декодирующих преобразователей.

Одним из путей создания преобразователя кода вычетов в напряжение является использование промежуточного перевода числа из СОК в позиционную систему счисления со смешанным основанием, с дальнейшим преобразованием его в напряжение на специальной матрице сопротивлений [2].

Ниже рассматриваются преобразователи кода вычетов в напряжение без промежуточного преобразования в позиционные системы счисления.

При построении преобразователей «код — напряжение» (ПКН), работающих непосредственно в СОК, возможно использование позиционного представления числа  $A$  с помощью ортогональных чисел [3] в виде

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_i - r_A P, \quad (2)$$

где  $A_i = \left\{ \frac{m_i P}{p_i} \right\}_{p_i}$  — ортогональные числа в заданной СОК;  $r_A =$

$= \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{P} \right]$  — ранг числа  $A$ . Квадратные скобки обозначают целую

часть дроби  $\frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{P}$ ;  $m_i$  — вес ортогонального числа  $A_i$ .

Возможно создание ПКН, основанных на использовании выражения (2). Однако удобнее использование представления  $A$  с меньшим, чем  $r_A$ , рангом  $r'_A$  [4]:

$$A = \sum_{i=1}^n \{\alpha_i A_i\}_P - r'_A P. \quad (3)$$

Из выражения (3) после несложных преобразований можно получить

$$A = \sum_{i=1}^n \{\alpha_i m_i\}_P \frac{P}{p_i} - r'_A P \quad (3')$$

или при работе с дробными числами

$$\frac{A}{P} = \sum_{i=1}^n \frac{\{\alpha_i m_i\}_{p_i}}{p_i} - r'_A. \quad (3'')$$

Как известно [5], выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  в электрических суммирующих устройствах параллельного типа определяется следующим выражением (рис. 1):

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_n}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{R_n}{R_i + R_{\text{вн}i}}} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{U_i}{R_i + R_{\text{вн}i}}, \quad (4)$$

где  $R_n$  — сопротивление нагрузки;  $R_{вн_i}$  — выходное сопротивление источника напряжения  $U_i$ .

В (4) необходимо обеспечить  $U_i$  пропорциональным  $\{\alpha_i m_i\}_{p_i}$ , суммирующие сопротивления  $R_i$  пропорциональными  $\frac{1}{p_i}$ . Тогда при введении цепи суммирования, обеспечивающей получение напряжения  $U_{r_A}$  с обратным знаком, пропорционального  $r_A$ , и при постоянных  $R_{вн_i}$  возможно моделирование формулы (3'') выражением (4).

При двоичном представлении и параллельной выдаче всех  $\alpha_i \{\alpha_i m_i\}_{p_i}$  можно получить простой перекодировкой входных шин преобразователя, а преобразование  $\{\alpha_i m_i\}_{p_i}$  в напряжение легко осуществить малоразрядным двоичным декодирующим преобразователем (ДДП), построенным, например, на сетке сопротивлений  $R$ ,  $\frac{R}{2}$  [6]. Выходное сопротивление ДДП постоянно, равно  $\frac{R}{2}$  и должно быть учтено при выборе сопротивления  $R_i$ .

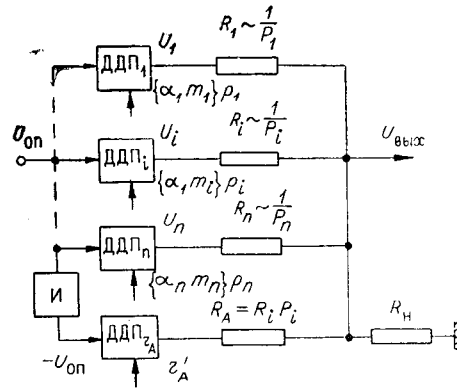


Рис. 1.

Представляет интерес вопрос о выборе выходных сопротивлений ДДП такими, чтобы требуемые  $R_i$  менялись по двоичному закону. Это уменьшает количество номиналов применяемых резисторов.

Ранг  $r'_A = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\{\alpha_i m_i\}_{p_i}}{p_i} \right]$  может вырабатываться для каждого преобразуемого числа специальной схемой в преобразователе. При введении в цифровую систему избыточного модуля  $p_{n+1} > (r'_A)_{\max}$ , например с целью контроля, ранг  $r'_A$  может быть вычислен по формуле

$$\{A\}_{p_{n+1}} = \left\{ \left\{ \sum_{i=1}^{i=n} \{\alpha_i m_i\}_{p_i} \right\}_{p_{n+1}} \left\{ \frac{P}{p_i} \right\}_{p_{n+1}} - r'_A \{P\}_{p_{n+1}} \right\}_{p_{n+1}}, \quad (5)$$

получаемой после взятия по модулю  $p_{n+1}$  обеих частей выражения (3') непосредственно в вычислителе.

Структурная схема ПКН на сопротивлениях представлена на рис. 1. Опорное напряжение ( $U_{оп}$ ) должно быть равно по величине  $(r'_A)_{\max} U$ , где  $U$  — эталонное напряжение, пропорциональное  $P$  — интервалу определения чисел. Таким образом, интервал определения ПКН (ИОПКН) в  $(r'_A)_{\max}$  раз больше действительного. Требуемая точность задания величин  $U_i$ ,  $R_i$ ,  $R_A$  определяется ИОПКН. Для уменьшения ( $U_{оп}$ ) и снижения требований по точности к нему и к  $U_i$ ,  $R_i$ ,  $R_A$  желательнее снизить  $(r'_A)_{\max}$  соответствующим выбором модулей  $p_i$ . Так как  $(\{\alpha_i m_i\}_{p_i})_{\max} = p_i - 1$ , из (3') следует, что

$$(r'_A)_{\max} \leq \left[ \sum_{i=1}^n \frac{p_i - 1}{p_i} \right] < n, \quad (6)$$

откуда видно, что при заданном ИО выгодно иметь меньшее число модулей соответственно большими по величине.

В описанном преобразователе возникают трудности введения автоматической корректировки результата при использовании кодов с избыточными основаниями.

Если от ПКН не требуется высокого быстродействия, то более предпочтительными будут ПКН с промежуточным преобразованием кода во временной интервал.

Преобразование числа, заданного в СОК, во временной интервал может быть произведено при использовании промежуточного перевода числа из СОК в какую-либо позиционную систему счисления с последующим преобразованием его во временной интервал. Однако такое «двойное» преобразование приводит к большим затратам времени и дополнительного оборудования.

Преобразование кода вычетов непосредственно во временной интервал осуществляется поиском решения системы сравнений, заданной кодом в СОК, методом перебора.

Преобразователь содержит  $n$  вычитающих счетчиков по количеству модулей  $p_i$ , определяющих выбранную СОК, работающих с коэффициентами пересчета  $p_i$ . В счетчики заносятся коды остатков по модулям  $p_i$  числа  $A$ , подлежащего преобразованию. По сигналу начала преобразования импульсы поступают на входы всех счетчиков одновременно и вырабатывают сигнал конца преобразования при установке в нуль всех счетчиков одновременно. Время между моментами начала и конца преобразования представляет искомый временной интервал.

Максимальный по длительности временной интервал при заданной системе модулей определяется полным интервалом определения и равен

$$T = \frac{1}{f} \prod_{i=1}^n p_i.$$

Преобразователи «код — время», работающие в позиционной системе счисления, не позволяют обеспечить простыми средствами правильное преобразование при наличии одиночной, а тем более, групповой ошибки. В преобразователе же, работающем в СОК, при введении в его состав двух дополнительных счетчиков, работающих соответственно по модулям  $p_{n+1}$ ,  $p_{n+2}$ , каждый из которых больше любого  $p_i$  ( $i \leq n$ ), корректируется любая одиночная или групповая ошибка (сбой) в пределах одного любого модуля [7]. Ошибки могут возникать при записи кода в счетчики или при сбое последнего во время работы.

Обозначим  $s_i$  сигнал «обнуления» счетчика с коэффициентом пересчета  $p_i$ . Тогда для обеспечения правильной работы преобразователя при наличии любой одиночной или групповой ошибки требуется построение схем выявления нуля таким образом, что они реализуют логическую функцию

$$S = \bigvee_{j=1}^{n+2} \left( \bigwedge_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n+2} s_i \right) \quad (7)$$

Сигнал конца преобразования формируется при «обнулении» любых  $(n+1)$  счетчиков из их общего числа, равного  $(n+2)$ .

Преобразователь «код — временной интервал» можно применить для создания преобразователя кода в напряжение (ПКН), использующего широтно-импульсный модулятор с последующим преобразованием скважности импульсов в напряжение. Такой ПКН дает возможность

при введении дополнительных модулей и построении схем обнаружения нулевых состояний регистров и счетчиков по формуле (7) легко корректировать одиночные и групповые ошибки преобразователя.

Широкое распространение получили в настоящее время преобразователи «вал — код», состоящие из кодовой маски, нанесенной на дисках, связанных с валом, и системы неподвижных чувствительных элементов, с которых снимается выходной код [8].

Рассмотрим построение кодовой маски и размещение считывающих элементов при получении цифрового эквивалента непосредственно в СОК.

Для считывания кода в СОК по модулям  $p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$  каждому разряду кода приведен в соответствие диск, с которого списывается число по данному модулю.

Используемые в настоящее время физические принципы считывания позволяют устойчиво различать два состояния. Поэтому коды вычетов удобно снимать группой щеток с каждого диска в виде соответствующих им двоичных кодов.

При неизбыточном кодировании в СОК к построению маски предъявляются два условия: 1) требование ликвидации возможности неоднозначности считывания остатков в пределах каждого модуля; 2) необходимость согласования отсчетов между дисками, работающими по разным модулям. Второе условие аналогично требованию согласования «грубого» и «точного» отсчетов в обычном позиционном многоотсчетном преобразователе.

Выполнение обоих этих условий можно обеспечить, например, при использовании метода «двойной щетки» [8]. Для этого необходимо ввести в состав преобразователя дополнительный диск с нанесенными на нем дисками шириной в половину дискретности преобразования

$$\left( \Delta = \frac{2\pi}{n \prod_{i=1}^n p_i} \right) \text{ и иметь две системы щеток, сдвинутых на половину}$$

этой дискретности. Считывание информации производится с основных дисков одной из систем щеток в зависимости от информации, снимаемой с дополнительного диска.

Допустимое поле рассогласования щеток  $\frac{1}{2 \prod_{i=1}^n p_i}$  оборота. При использовании метода утроенной щетки допустимое поле рассогласования можно увеличить до  $\frac{2}{3 \prod_{i=1}^n p_i}$  оборота.

При построении преобразователя в СОК можно вместо использования двойного количества щеток нанести на маску двойное количество кодовых комбинаций.

Преобразователь, основанный на методике «двойного кодирования», имеет диск или группу дисков для считывания каждого модуля. На каждом таком диске или группе дисков нанесена и снимается щетками последовательность двоичных кодов длиной  $2 \prod_{i=1}^n p_i$ . Последовательность, предназначенная для считывания остатка по модулю  $p_i$ , состоит из  $\frac{\prod_{i=1}^n p_i}{p_i}$  одинаковых последовательностей  $2 p_i$  различных

одинаковых последовательностей  $2 p_i$  различных

двоичных кодов, расположенных так, что расстояние между двумя соседними кодовыми комбинациями по всей длине диска равно единице, и каждому остатку по модулю  $P_i$  соответствуют две соседние кодовые комбинации. При этом сдвиг щеток, предназначенных для считывания данного модуля, на величину, меньшую  $\frac{1}{2 \prod_{i=1}^n p_i}$  оборота, не приведет

к ошибке отсчета остатка.

Описанный преобразователь позволяет согласовывать отсчеты различных модулей при сдвиге щеток от среднего положения на величину, меньшую  $\frac{1}{4 \prod_{i=1}^n p_i}$  оборота. Это можно сделать следующим образом.

Назовем условно «четной» первую из двух кодовых комбинаций, соответствующих некоторому остатку, «нечетной» — вторую. По сигналу считывания «четного» числа с одного из модулей, принятого за начало отсчета и сдвинутого на  $\frac{1}{4 \prod_{i=1}^n p_i}$  оборота в сторону уменьшения числа,

коды, считанные со всех других модулей, изменяются на единицу в сторону увеличения, по сигналу «нечетного» числа — не изменяются. При этом рассогласование отсчетов модулей на единицу остатка исключается.

Описанные схемы преобразователей могут быть выполнены с использованием контролирующих или корректирующих кодов путем добавления избыточных разрядов. Такие преобразователи позволяют корректировать любую одиночную или групповую ошибку в пределах одного любого разряда.

Ошибка может вызываться как механическими повреждениями и деформациями диска, так и случайными или систематическими сбоями электронного оборудования. Дополнительное оборудование преобразователя с использованием корректирующих кодов в системе остаточных классов будет определяться оборудованием избыточных разрядов.

Циклический преобразователь угла поворота вала в код вычетов с временной разверткой, у которого угловая величина вначале преобразуется в угол сдвига фаз с помощью фазовращателя, отличается от обычного преобразователя угла сдвига фаз в двоичный позиционный код [8] тем, что вместо одного двоичного счетчика, работающего по модулю  $N = 2^n$ , используется ряд счетчиков с коэффициентами пересчета, соответственно равными модулям выбранной СОК. Их общий коэффициент пересчета равен интервалу определения  $M = \prod_{i=1}^n p_i$ .

В одноотсчетном преобразователе частота запитки фазовращателя в  $M$  раз меньше частоты, поступающей одновременно на все счетчики. Импульс со схемы выделения момента перехода выходного напряжения фазовращателя через нуль переписывает с помощью вентиля переписи (ВП) информацию в коде вычетов об угловом положении фазовращателя из счетчиков в выходной регистр.

При невозможности обеспечения требуемой точности преобразования угла поворота в сдвиг фаз одним фазовращателем применяют многоотсчетные системы. Несколько одноотсчетных датчиков связывают редукторами (механическими или электрическими).

Одна из возможных блок-схем построения двухотсчетного преобразователя приведена на рис. 2. При двухотсчетной системе съема информации полный интервал определения  $M$  разбивается на два поддиапазона:  $M = M_1 M_2$ . Одноотсчетный преобразователь, имеющий интервал определения  $M_1$ , связан с входным валом передаточным отношением  $i = \frac{M}{M_1 k}$  при условии, что интервал определения одноотсчетного преобразователя соответствует полному обороту его. Здесь  $k$  — число оборотов входного вала, соответствующее полному интервалу изменения входной величины. Такой преобразователь не имеет датчика «грубого» отсчета, как при использовании позиционной системы счисления. Оба одноотсчетных преобразователя можно назвать датчиками «точного» отсчета.

Известно, что требования по точности, предъявляемые к редукторам, работающим в отсчетных системах, зависят от их передаточных отношений и чем меньше оно, тем меньше эти требования. Поэтому в случае небольшого значения  $k$  для связи преобразователя с входным валом требуется редуктор высокой точности. Если преобразователь с интервалом определения  $M_2$  связать редуктором не непосредственно с входным валом, а со вторым преобразователем и если  $M_1$  близко по величине к  $M_2$ , то «вторичный» редуктор имеет небольшое передаточное отношение  $i_2 = \frac{M_2}{M_1}$  и, следовательно, невысокую требуемую точность. В случае  $k = \frac{M}{M_1}$  двухот-

счетный преобразователь в целом не требует прецизионных редукторов.

Работа каждого одноотсчетного преобразователя аналогична описанной выше. В преобразователе с интервалом определения  $M_1$  фазовращатель  $\Phi В_1$  питается напряжением частоты  $f_1 = \frac{f}{M_1}$ , а в преобразователе с интервалом определения  $M_2$  фазовращатель  $\Phi В_2$  запитывается частотой  $f_2 = \frac{f}{M_2}$ . Для формирования гармонического напряжения, необходимого для питания фазовращателей, служат формирователи синусоиды  $\Phi С_1$  и  $\Phi С_2$ .

В преобразователе «угол — фаза — время — код» кодовая шкала развертывается во времени, пропорциональном углу поворота вала, на счетчиках-делителях частоты и аналогична кодовой маске, наносимой на диски преобразователя, работающего по методу считывания. Поэтому для сопряжения отсчетов можно использовать методы согласования дисков, изложенные выше.

«Временная» единица дискретности описываемого преобразователя эквивалентна шагу дискретности в кодовой маске преобразователя. На рис. 2 применена схема сопряжения отсчетов с разделением «временной» единицы дискретности любого отсчета преобразователя, равной  $\frac{1}{f}$ , пополам с помощью делителя частоты  $ДЧ_2$ . В зависимости от

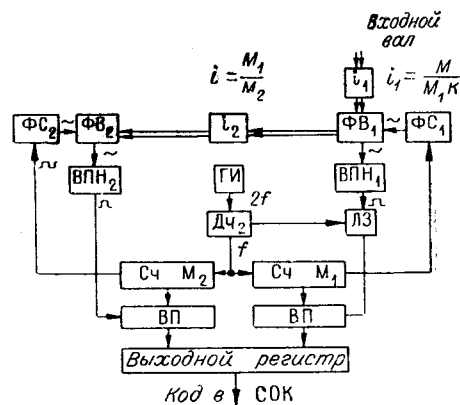


Рис. 2.

состояния ДЧ<sub>2</sub> линия задержки ЛЗ либо задерживает выходной импульс с ВПН<sub>1</sub> на время  $\tau_{ЛЗ} = \frac{1}{2f}$ , либо нет. При этом угловое допустимое рассогласование между отсчетами меньше  $\frac{\pi}{M_1}$  радиан, а поле допуска размещено в одну сторону от идеального расположения линии считывания.

В рассмотренном преобразователе необходим редуктор со специальным передаточным отношением между отсчетами, что трудно осуществимо при применении фазовращателей с электрической редукцией.

В случае использования многоотсчетной системы фазовращателей, связанных двоичной редукцией, возможно кодирование в СОК информации, снимаемой отдельно с датчиков грубого (ГО) и точного (ТО) отсчетов. При этом код и ГО, и ТО необходимо представить в СОК по группе модулей, общий интервал определения которых равен количеству дискретных состояний ( $M$ ), на которые разбит полный диапазон изменения кодируемой величины. При известной величине редукции  $2^n$ , выраженной в СОК, можно вычислить угол поворота кодируемого вала в коде вычетов по формуле

$$\{A_{ГО}\}_M \{2^n\}_M + \{A_{ТО}\}_M = \{A\}_M, \quad (8)$$

где  $\{A_{ГО}\}_M$  и  $\{A_{ТО}\}_M$  — значения грубого и точного отсчетов, взятые в коде вычетов в полном интервале определения  $M$ . Это вычисление можно произвести непосредственно в вычислителе.

Частота синусоидального напряжения питания фазовращателя определяется частотой съема сигналов переполнения счетчика, работающего по модулю  $M_1$  ( $M_1$  должно быть больше  $2^n$ ), и равна  $\frac{f_{Ги}}{M_1}$ . Счетчики, не входящие в состав счетчика по  $\text{mod } M_1$ , следует сбрасывать в нуль перед началом каждого цикла преобразования. Следует отметить возможность использования в данном случае одной группы счетчиков для снятия кода вычетов и по грубому, и по точному отсчетам.

Преобразователи с обратной связью, с цифровым и аналоговым нуль-органом являются предметом специального рассмотрения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Бухштаб. Теория чисел. М., «Просвещение», 1966.
2. Г. К. Кладов, Е. М. Ляховицкий, А. Я. Шпильберг. Преобразующие устройства в коде вычетов.— В сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 3. Харьков, 1966.
3. А. Свобода. Развитие вычислительной техники в Чехословакии. Система счисления остаточных классов.— Кибернетический сборник, 8. М., «Мир», 1964.
4. И. Я. Акушский, В. К. Хацкевич. Инверсные представления чисел в системе остаточных классов.— В сб. «Цифровая вычислительная техника и программирование», вып. 2. М., «Советское радио», 1967.
5. В. Б. Смоллов и др. Вычислительные машины непрерывного действия. М., «Высшая школа», 1964.
6. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжения. Под ред. В. Б. Смоллова и Н. А. Смирнова. Л., «Энергия», 1967.
7. И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий. Машинная арифметика в остаточных классах. М., «Советское радио», 1968.
8. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

Поступила в редакцию  
26 ноября 1968 г.