Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. М. Гречишников, С. В. Гречишников, Обобщенная математическая модель цифровых преобразователей перемещений и методы её анализа, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 1998, выпуск 6, 111–119

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu12>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.237.206.68

26 апреля 2023 г., 18:16:12

Математическое моделирование и информатика

УДК. 621.389; 681.2

В.М. Гречишников, С.В. Гречишников

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И МЕТОДЫ ЕЕ АНАЛИЗА

Предложен новый подход к получению обобщенной математической модели цифровых преобразователей перемещений в виде уравнения идеального цифроаналогового преобразования их выходного кода, процессы изменения разрядных цифр которого заданы в виде логических функций от входного перемещения и точек действительных многомерных пространств параметров их измерительного тракта. На основе этого подхода получены обобщенные уравнения преобразования волоконно-оптических цифровых преобразователей перемещения (ВОЦПП), объединяющие все частные математические модели энергоинформационных процессов, протекающих в их аналоговых, аналого-цифровых и цифровых структурных блоках при работе в статическом и динамическом режимах.

Современная теория цифровых преобразователей перемещения (ЦПП) создавалась в течение последних десятилетий усилиями многих научных коллективов и отдельных авторов [1 – 6, 9, 10]. Разработанные теоретические методы анализа и синтеза сыграли важную роль при создании широкой номенклатуры ЦПП, основанных на самых разнообразных физических принципах. В то же время непрерывное ужесточение требований к главным эксплуатационным характеристикам преобразователей (точности, массогабаритным показателям и надежности) требует более детального и всестороннего обоснования их технических возможностей в реальных условиях применения. Традиционные теоретические методы исследования не обеспечивают необходимой адекватности между реальными энергоинформационными процессами, протекающими в измерительных каналах ЦПП, и их математическими моделями. Это обусловлено тем, что функция преобразования аналого-цифрового преобразователя (ЦПП) заменяется частной математической моделью его аналогового блока. При этом без достаточного обоснования делается допущение о том, что вид логического алгоритма формирования выходного кода не оказывает влияния на метрологические характеристики преобразователя в целом. Кроме того, не учитывается характер трансформации видов законов распределения (ЗР) входного перемещения и отдельных составляющих случайной погрешности при прохождении формируемых сигналов через нелинейный многоканальный измерительный тракт ЦПП. В результате информация о свойствах разрабатываемых преобразователей, получаемая с использованием известных подходов, обладает недостаточной достоверностью, что приводит к неоптимальным структурно-функциональным решениям и неоправданным экономическим издержкам на этапах разработки ТЗ, макетирования и производства ЦПП.

В связи с изложенным предлагается более общий подход к математическому моделированию ЦПП, позволяющий объединить все частные математические модели аналоговых, аналого-цифровых и цифровых структурных блоков в единое математическое выражение, удобное для последующего анализа. Сущность предлагаемого подхода основана на представлении характеристики «перемещение – код» в виде уравнения идеального цифроаналогового преобразования выходного кода, процессы изменения разрядных цифр которого заданы в виде логических функций от входного перемещения и точек действительных многомерных пространств параметров измерительного тракта ЦПП.

В качестве примера рассмотрим методику получения обобщенной математической модели волоконно-оптических цифровых преобразователей перемещений (ВОЦПП), принципы построения которых подробно изложены в [10].

Как видно из обобщенных структурных схем преобразователей (рис. 1, 2), работающих в режимах проходящего и отраженного излучения, ВОЦПП можно декомпозировать на три отдельных функциональных блока: 1–блок формирования и преобразования аналоговых сигналов (БФАС); 2–блок компараторов (БК), реализующий аналого-дискретное

преобразование выходных сигналов БФАС; 3-блок преобразования цифровых сигналов (БФПК).

Р и с. 1. Обобщенная структурная схема ВОЦПП экранного типа: БИ – блок излучателя; ОМБ – оптико-механический блок; БФУ – блок фотоусилителей; $\{c_i\}$, $\{b_i\}$, $\{d_i\}$ – множества конструктивных и внешних факторов; ВОЛС_n, ВОЛС_{np} – передающая и приемная части волоконно-оптической линии связи

Р и с. 2. Обобщенная структурная схема ВОЦПП отражательного типа: БИ – блок излучателя; ОМБ – оптико-механический блок; БУДС – блок устройств двунаправленной оптической связи; БФУ – блок фотоусилителей; $\{c_i\}$, $\{b_i\}$, $\{d_i\}$ – множества конструктивных и внешних факторов; ВОЛС_{n-np} – приемно-передающая часть волоконно-оптической линии связи

В преобразователе на рис. 1 измеряемое перемещение 4 воздействует на подвижный кодовый элемент (КЭ), расположенный в оптико-механическом блоке (ОМБ). Оптическое излучение $P_1 \dots P_n$ от блока излучателя (БИ) с помощью передающих волоконно-оптических линий связи подводится к точкам считывания информации с КЭ, в качестве которых могут быть использованы двоичные кодовые маски, растровые сопряжения, комбинаторные шкалы и другие типы оптических модуляторов излучения [1]. Функции считывающих элементов СЭ выполняют входные торцы световодов ВОЛС_{np}, с помощью которых промодулированные оптические сигналы $P_1(x) \dots P_n(x)$ передаются в блок фотоусилителей БФУ. Выходные сигналы БФУ $u_1(x) \dots u_n(x)$ в блоке компараторов (БК) преобразуются в логические сигналы $U_1(x) \dots U_n(x)$, которые в блоке формирования и преобразования кода (БФПК) преобразуются в цифровой эквивалент измеряемого перемещения.

Особенностью преобразователя на рис. 2 является то, что ВОЛС в нем используется в режиме двунаправленной передачи оптических сигналов в сочетании с кодовым элементом отражательного типа. При этом функции подвода излучения от БИ к точкам считывания информации с КЭ и передачи промодулированного излучения в БФУ совмещены в одном световоде. Пространственное разделение встречных оптических потоков осуществляется в блоке устройств двунаправленной оптической связи (БУДС), который в простейшем случае представляет собой набор волоконно-оптических Y-ответвителей.

В соответствии с приведенными структурными схемами наиболее существенными энерго-информационными преобразованиями, протекающими в j -том измерительном канале ВОЦПП, являются: генерация излучения $P_{изл j}$ с помощью лазерных или светоизлучающих диодов; передача излучения по ВОЛС, эффективность которой оценивается энергетическим К.П.Д. η_j ; пространственная модуляция оптических сигналов, которая задается нормированной функцией модуляции f_{mj} ; фотоэлектрическое преобразование на фотоприемнике с чувствительностью S_{pj} ; а также операция масштабирования $K_{y j}$ аналоговых сигналов; аналого-цифровое V_j и логическое преобразование электрических сигналов F_i , используемых при формировании разрядных цифр выходного кода [11].

Пусть имеем ВОЦПП, вырабатывающий цифровой сигнал в позиционной системе счисления с основанием q . Результат аналого-цифрового преобразования, реализуемого в ВОЦПП, можно представить в виде кодового вектора размерности n : $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n) \in \mathbf{M}_a$, где $\mathbf{M}_a$ — множество таких векторов. Каждой комбинации составляющих этого вектора в процессе преобразования ставится в соответствие вполне определенный номер N уровня квантования входного перемещения x . Десятичный эквивалент числа N может быть найден в результате суммирования значений каждого символа a_i с соответствующим весовым коэффициентом q_i [2]:

$$N = \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (1)$$

В этом выражении $[N] = [a_i] = 1$. В реальных преобразователях символу a_i соответствуют определенные значения электрического напряжения и поэтому $[a_i] = B$. Следовательно, десятичный эквивалент кодовой комбинации в реальных ЦПП имеет размерность электрического напряжения, численное значение которого определено в десятичной системе счисления:

$$u_N = \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (2)$$

Представим теперь, что на выход ВОЦПП включен линейный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий выходной код ВОЦПП в пропорциональный аналоговый квантованный сигнал электрического напряжения $u_{кв}$. Согласно [2, 9], выходной сигнал ЦАП равен

$$u_{кв} = m \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (3)$$

где m — безразмерный коэффициент пропорциональности, определяемый значением опорного напряжения ЦАП. Из сравнения (2) и (3) видно, что при $m = 1$, $u_{кв} = u_N$. Поскольку операция определения N по (1) является линейной по отношению к кодовым комбинациям на выходе ВОЦПП, то сигнал u_N , а следовательно, и $u_{кв}$ однозначно отображает выходной код ВОЦПП.

Полагая $a_i = a_i(x)$, получим выражение

$$u_{кв}(x) = \sum_{i=0}^n a_i(x) q_i \quad (4)$$

определяющее закон изменения выходного сигнала ЦАП в функции от входного перемещения x . Как правило, в условиях системного применения ВОЦПП, его выходная информация должна иметь размерность измеряемого перемещения. Для приведения выходного сигнала ЦАП к размерности входной величины, его необходимо подвергнуть линейному преобразованию с коэффициентом пропорциональности $S = X_{max} / u_{max}$, $[S] = [x] / B$, где X_{max} — верхний предел диапазона преобразования ВОЦПП; u_{max} — максимальное значение выходного сигнала электронного ЦАП. В результате получаем

$$X_{кв}(x) = mS \sum_{i=0}^n a_i(x) q_i \quad (5)$$

Поскольку крутизна нормирующей прямой $y = m S x$ не влияет на координаты смены значений выходного кода, то для дальнейшего анализа в ряде случаев удобно принять $S = m = 1$.

Если значение весовых коэффициентов q_i и разрядных цифр a_i заданы идеально точно (идеальный ЦАП), то погрешность характеристики (5) определяется только позиционной точностью формирования символов выходного кода $a_i(x)$. Это позволяет заменить многоразрядный выходной код реального ВОЦПП эквивалентным по информативности одним аналоговым квантованным сигналом $X_{кв}(x)$, полученным в результате идеального цифро-аналогового преобразования «код–перемещение», и применить для его исследования хорошо разработанные теоретические методы [8].

Реализация такого подхода в общем виде сводится к следующему.

Пусть $R_\alpha^{n_\alpha}$ – действительные пространства конструктивных и схемотехнических параметров (далее – параметров) отдельных функциональных элементов ВОЦПП, причем каждое из этих пространств имеет свою размерность n_α , $\alpha = (p, \eta, f, S, k, u, v)$ – индексы пространств, точки которых являются аргументами указанных выше частных математических моделей. Выделим области $D_\alpha^0 \subseteq R_\alpha^{n_\alpha}$ и $D_\alpha \subseteq R_\alpha^{n_\alpha}$ и точки $c_\alpha^0 \in D_\alpha^0$ и $c_\alpha \in D_\alpha$, координатами которых являются наборы номинальных $(c_{\alpha 1}^0, c_{\alpha 2}^0, \dots, c_{\alpha j}^0, \dots, c_{\alpha n_\alpha}^0)$ и действительных $(c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2}, \dots, c_{\alpha j}, \dots, c_{\alpha n_\alpha})$ параметров, соответствующих идеальному и реальному ВОЦПП. Разности координат $\Delta c_{\alpha j} = c_{\alpha j}^0 - c_{\alpha j}$ представляют собой отклонения параметров от номинальных значений, являющихся следствием влияния инструментальных погрешностей и внешних факторов. Совокупность отклонений $(\Delta c_{\alpha 1}, \Delta c_{\alpha 2}, \dots, \Delta c_{\alpha j}, \dots, \Delta c_{\alpha n_\alpha})$ будем рассматривать как координаты точек $\Delta c_\alpha \in \Delta D_\alpha \subseteq R_\alpha$.

С учетом введенных обозначений, коэффициенты $a_i(x)$ в (5) можно рассматривать как некоторые логические функции F_i от упорядоченных наборов выходных сигналов компараторов $V = (V_1, V_2, \dots, V_k) \in M_V$ (M_V – множество таких наборов), отображающие логический алгоритм формирования i -того разряда выходного кода:

$$a_i = F_i(V). \quad (6)$$

Математическая модель процесса аналого-цифрового преобразования (компарирования) сигналов может быть задана в виде

$$V_j(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta u_j \geq 0; \\ 0, & \text{при } \Delta u_j < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta u_j = u_j(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha) - u_{\Pi j}(c_\alpha^0, \Delta c_\alpha)$, $u_{\Pi j} = \text{const}$ – порог срабатывания j -того компаратора. Если операции V_j реализуются на основе взаимного сравнения j -того и m -ного сигналов, то $\Delta u_{jm} = u_j(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha) - u_m(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha)$, $(j, m) \in N$.

Выражение (7) позволяет задавать выходные сигналы компараторов в положительной логике, наиболее распространенной в схемотехнике ВОЦПП. Кроме того, оно позволяет сформировать позиционно-зависимые логические сигналы $V_j(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha)$, аргументами которых, кроме измеряемого параметра x , являются наборы номинальных значений параметров c_α^0 и инструментальных погрешностей Δc_α ВОЦПП.

Конкретный вид логических функций $F_i(V)$ и число логических переменных V_i определяется способом кодирования информации в ВОЦПП. В простейшем случае, когда преобразователь выполнен на основе маски натурального двоичного кода, для каждого разряда имеет место равенство $V_i = a_i$.

В преобразователях с более сложным алгоритмом формирования выходного кода, в том числе с двухотсчетной структурной схемой, аргументами функций $F_i(V)$ могут быть не только сигналы i -тых компараторов, но и сигналы других разрядов, а также цифровые сигналы согласующих и управляющих каналов. Таким образом, выражение (7) определяет логическую модель формирования i -того разряда выходного кода, а уравнение

$$X_{кв}(x) = \sum_{i=1}^n F_i(V) \cdot q_i \quad (8)$$

представляет собой логическую модель функционирования БФПК всего ВОЦПП. В общем случае выходные сигналы фотоусилителей, входящие в уравнение (5) в качестве аргументов

функций V_j , могут быть описаны математической моделью БФАС, которая для j -того измерительного канала имеет вид

$$u_j = u_{mj} f_{mj}(x, c_f^0, \Delta c_f) + u_{oj}(c_u^0, \Delta c_u), \quad (9)$$

где u_{mj} – амплитуда сигнала на выходе j -того фотоусилителя; f_{mj} – нормированная функция модуляции излучения в j -той точке считывания; $c_f^0, \Delta c_f$ – конструктивные параметры j -той кодовой дорожки и считывающего элемента; Δu_{oj} – напряжения дрейфа на выходе преобразователя фототока в напряжение; $c_u^0, \Delta c_u$ – параметры усилителя, определяющие номинальное значение, а также временные и температурные флуктуации напряжения дрейфа. Для типовой схемы включения фотоприемника в гальваническом режиме [1] амплитудное значение сигнала u_{mj} можно представить в виде

$$u_{mj} = P_{изл j}(c_p^0, \Delta c_p) \eta_j(c_\eta^0, \Delta c_\eta) S_{pj}(c_s^0, \Delta c_s) K_{yj}(c_k^0, \Delta c_k), \quad (10)$$

где $P_{изл j}$ – мощность оптического сигнала, вводимого в j -тый канал ВОЛС; S_{pj} – интегральная чувствительность фотоприемника; K_{yj} – коэффициент преобразования преобразователя ток – напряжения; η_j – коэффициент передачи оптической мощности от излучателя по j -тому каналу ВОЛС к j -тому фотоприемнику при $f_{mj} = 1$. Тогда математическая модель формирования аналогового электрического сигнала на выходе j -того фотоусилителя может быть получена в виде

$$u_j(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha) |_{\alpha \neq V} = P_{изл j}(c_p^0, \Delta c_p) \eta_j(c_\eta^0, \Delta c_\eta) S_{pj}(c_s^0, \Delta c_s) K_{yj}(c_k^0, \Delta c_k) \times \\ \times f_{mj}(x, c_f^0, \Delta c_f) + u_{oj}(c_u^0, \Delta c_u). \quad (11)$$

Функция $f_{mj}(x, c_f^0, \Delta c_f)$ определяет закон модуляции оптического сигнала в j -том канале считывания с учетом номинальных значений геометрических параметров считывающих и кодовых элементов и инструментальных погрешностей их изготовления. В случае, когда освещенность равномерно распределена по площади считывающего элемента [$E(x,y) = const$], нормированная функция модуляции может быть задана выражением

$$f_{mj} = S_j(x, c_f^0, \Delta c_f) / S_{0j}(c_f^0, \Delta c_f), \quad (12)$$

где $S_j(x, c_f^0, \Delta c_f)$ – функция изменения площади взаимного перекрытия областей кодового и считывающего элементов; $S_{0j}(c_f^0, \Delta c_f)$ – полная площадь считывающего элемента.

Описанный способ задания функции модуляции позволяет отобразить в выражении (11) индивидуальный характер нелинейных искажений формируемых аналоговых сигналов и с учетом (7) наиболее адекватно отобразить причины возникновения и характер случайного проявления результирующей погрешности преобразования. Более подробную информацию о методах получения модуляционных функций можно найти в [10].

Таким образом, если все параметры измерительного тракта идеальны ($\Delta c_\alpha = 0$), а конкретный вид зависимостей (7), (8), (11) и (12) известен, то обобщенную математическую модель идеального ВОЦПП можно представить в виде

$$X_{кв}^0(x) = m S \sum_{i=1}^n F_i[V^0(x, c_\alpha^0)] q_i, \quad (13)$$

где $V^0 = (V_1^0, V_2^0, \dots, V_k^0) \in M_V$ – наборы выходных сигналов идеальных компараторов. Для линейного ВОЦПП эта характеристика имеет вид, показанный на рис. 3, а (кривая 3). Идеальный преобразователь свободен от инструментальных и динамических погрешностей, инвариантен к воздействию ВЭФ и характеризуется только методической погрешностью квантования.

Влияние конструктивно-технологических факторов и ВЭФ может быть учтено введением соответствующих отклонений Δc_α параметров модели (11) от номинальных значений

$$X_{кв}(x) = m S \sum_{i=1}^n F_i[V(x, c_\alpha^0, \Delta c_\alpha)] q_i. \quad (14)$$

Наиболее распространен в технике цифрового преобразования перемещений натуральный двоичный код, что обусловлено его естественной информационной совместимостью с цифровыми сигналами, используемыми ЭВМ. Для двоичного кода $q_i = 2^i$, $a_i = 0$ или 1. Находят также применение коды Грея, двоично-десятичные, комбинаторные и ряд других, которые можно достаточно легко преобразовать в натуральный двоичный код известными методами [2].

Без ущерба для общности рассуждений в дальнейшем можно рассматривать ВОЦПП, работающие в двоичной системе счисления. Отметим, что в общем случае применяемая

система счисления должна обеспечивать представление любого числа из заданного диапазона и единственность такого представления [9].

Выражение (14) является обобщенной математической моделью реального ВОЦПП, описывающей процесс дискретного изменения выходного сигнала $X_{кв}(x)$ при непрерывном изменении входного перемещения во всем диапазоне преобразования при наличии инструментальных погрешностей и ВЭФ. Она позволяет получать весьма обширную и глубокую информацию о свойствах ВОЦПП практически при любых способах их построения. Выражение (14) является интегральной характеристикой процесса преобразования в ВОЦПП, поскольку она учитывает вклад каждого разряда в выходной квантованный аналоговый сигнал. С ее помощью непрерывную входную величину можно представить в виде квантованного аналогового сигнала (см. рис. 3, кривая 3), информационные и метрологические характеристики которого полностью совпадают с характеристикой выходного сигнала ВОЦПП, поскольку ЦАП – идеальное линейное звено.

Р и с. 3. Выходные характеристики ВОЦПП (а):
1 - нормирующая прямая $y = x$; 2, 3 - идеальная и реальная функции преобразования соответственно и методы получения суммарной погрешности (б) и погрешности воспроизведения уровней квантования (в и г)

Основной задачей математического моделирования *ВОЦПП* в динамическом режиме является определение допустимой скорости изменения входной величины, при которой обеспечивается истинная последовательность смены выходного кода и соответствующие показатели его точности и достоверности [12]. Необходимость исследования динамического режима обусловлена тем, что, несмотря на малую инерционность современных полупроводниковых излучателей и фотоприемников, наличие собственных емкостей при большой скорости изменения входного перемещения может изменить амплитуду генерируемых сигналов и их постоянную составляющую. Аналогичным образом изменяются и частотные свойства применяемых операционных усилителей тока.

Исследование динамических характеристик *ВОЦПП* сводится к получению количественных оценок функций влияния на статистические характеристики результирующей погрешности постоянных времени аналоговых электронных компонентов, задержек распространения и дисперсии оптического сигнала в волоконно-оптических линиях связи, а также вида алгоритма цифрового преобразования информации в *БФПК*.

Для исследования динамических характеристик *ВОЦПП* обобщенная математическая модель может быть получена на основе выражения (14) в виде

$$X_{\kappa\epsilon}(t) = m \sum_{i=1}^n F_i[V(x(t), c_\alpha^0, \Delta c_\alpha, c_\tau)] q_i, \quad (15)$$

где $c_\tau \in D_\tau \subseteq R_\alpha$ — точки действительного пространства динамических параметров элементной базы *ВОЦПП*.

В качестве примера рассмотрим как с помощью математических моделей (13) и (14) можно теоретическими методами получать следующую информацию о свойствах проектируемого *ВОЦПП*.

1. Определение правильности построения функциональной схемы на стадии ее разработки. Критерий правильности функциональной схемы может быть получен с использованием математической модели идеального *ВОЦПП* (13):

$$X_{\kappa\epsilon i}^0(x) - X_{\kappa\epsilon i-1}^0(x) = \Delta X_{\kappa\epsilon}^0 = \text{const} > 0, \quad (16)$$

где $\Delta X_{\kappa\epsilon}^0$ — расчетный шаг квантования входного перемещения, отсчитанный по оси ординат (см. рис. 3), $X = 0 \dots X_{\max}$.

Это означает, что для любого значения i разность между двумя последовательными отсчетами, полученными по (13), должна быть равна номинальному шагу квантования по уровню входного сигнала (единице младшего разряда выходного кода). Аналогичный критерий для реального преобразователя имеет вид

$$X_{\kappa\epsilon i+1}(x) - X_{\kappa\epsilon i}(x) = \Delta X_{\kappa\epsilon} = \text{const} > 0; \quad x_{i+1} = x_i^0 + \Delta x^0 \pm \Delta \epsilon_{i+1}, \quad (17)$$

где x_i^0 , Δx^0 — теоретические координаты смены кода и расчетный шаг квантования входного перемещения; $\Delta \epsilon_{i+1}$ — инструментальная погрешность.

2. Определение числовых характеристик погрешности воспроизведения уровней квантования $\Delta \epsilon_i$. Эта задача может быть решена двумя методами. Первый из них сводится к следующему. Продифференцируем (16) и (18) по x и результат дифференцирования представим в виде δ -функций в точках смены кода:

$$\frac{dX_{\kappa\epsilon}^0(x)}{dx} = \delta^0(x - i\Delta x_{\kappa\epsilon}^0); \quad (18)$$

$$\frac{dX_{\kappa\epsilon}(x)}{dx} = \delta(x - i\Delta x_{\kappa\epsilon}^0 + \Delta \epsilon_i), \quad (19)$$

где $i = 0 \div 2^n$ — номер кванта выходного аналогового сигнала ЦАП; n — число разрядов выходного кода; $\Delta x_{\kappa\epsilon}^0$ — расчетный шаг квантования по оси x (см. рис. 3).

Находя разность аргументов реальной и идеальной δ -функций во всем диапазоне преобразования, получаем массив погрешностей $\Delta \epsilon_i$ (см. рис. 3, в):

$$\Delta \epsilon_i = \arg \delta - \arg \delta^0. \quad (20)$$

Второй способ нахождения массива погрешностей $\Delta \epsilon_i$ сводится к нахождению разности между обобщенными моделями реального и идеального преобразователей:

$$\Delta_\epsilon(x) = X_{\kappa\epsilon}(x) - X_{\kappa\epsilon}^0(x). \quad (21)$$

Величина $\Delta_{\varepsilon}(x)$ представляет собой последовательность позиционных импульсных сигналов (см. рис. 3, *з*), полярность которых определяет знак погрешности, а «длительность» — ее абсолютное значение. Эти методы достаточно просто реализуются на ЭВМ.

Располагая массивом погрешностей воспроизведения Δ_{ε_i} , можно легко рассчитать ее числовые характеристик, как случайной величины, определив ее математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, гистограмму распределения и другие параметры в соответствии с [7].

3. Определение характеристик суммарной погрешности преобразования. Эта задача может быть решена путем нахождения разности между реальной функцией преобразования *ВОЦПП* (14) и нормирующей прямой (см. рис. 3, *б*):

$$\Delta_{\Sigma}(x) = X_{\kappa\varepsilon}(x) - m S x. \quad (22)$$

С помощью машинных методов анализа может быть рассчитана гистограмма распределения суммарной погрешности и ее числовые характеристики с учетом различных законов распределения входного перемещения.

4. Определение достоверности выходного кода $P(\Delta_{\varepsilon})$ и информационной способности M выполняется путем вычисления вероятности [3]:

$$P(\Delta_{\varepsilon}) = P(|\Delta_{\Sigma}| \leq \frac{360}{2^{N+1}}). \quad (23)$$

Тогда

$$M = P(\Delta_{\Sigma}) N, \quad (24)$$

где N — расчетное значение информационной емкости *ВОЦПП* [бит].

5. Определение функций влияния конструктивных и внешних факторов выполняется путем многократного вычисления с. к. о. результирующей погрешности при изменении какого-либо конструктивного или внешнего фактора в заданном диапазоне. При этом нетрудно получить графические зависимости с. к. о. суммарной погрешности от изменения какого-либо параметра:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\Delta_{k_i}} &= f(\Delta_{k_i}); \\ \sigma_{\Delta_{B\Phi_i}} &= f(\Delta_{B\Phi_i}). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

На их основе можно рассчитать коэффициенты влияния погрешностей отдельных блоков и ВЭФ на результирующую погрешность *ВОЦПП* по выражениям

$$A_i = \beta \frac{\partial \sigma}{\partial \Delta_{k_i}}; A_i^* = \beta \frac{\partial \sigma}{\partial \Delta_{B\Phi_i}}, \quad (26)$$

где β — коэффициент относительного рассеяния, зависящий от вида закона распределения погрешности. Или в относительных единицах:

$$A_i = \beta_k \frac{\partial \sigma}{\partial \Delta_{k_i}} \frac{K_{iH}}{X_H}; A_i^* = \beta \frac{\partial \sigma}{\partial \Delta_{B\Phi_i}} \frac{B\Phi_{iH}}{X_H}, \quad (27)$$

где K_{iH} , X_H — номинальные значения параметра и перемещения.

Отметим, что методы анализа характеристик *ВОЦПП* в динамическом режиме практически не отличаются от изложенных выше.

Таким образом, разработанные математические модели (13), (14), (15) обладают максимальным уровнем общности, так как в них одновременно учитываются параметры, характеризующие статический и динамический режимы работы преобразователей. Основные их преимущества перед известными моделями заключаются в том, что они позволяют количественно оценить влияние на результирующую погрешность преобразования множества инструментальных погрешностей измерительного тракта, вида логического алгоритма формирования выходного кода, конструктивных особенностей применяемых оптических модуляторов, а также вида ЗР входного перемещения и скорости изменения входной величины. Кроме того, они позволяют учесть процессы временной деградации радиоэлектронных компонентов и износа кинематических узлов *ВОЦПП* и на этой основе прогнозировать моменты наступления метрологических отказов.

По глубине, объему и достоверности получаемая с их помощью информация сравнима только с физическим экспериментом. Это позволяет создать качественно новое

информационное обеспечение проектных и опытно-конструкторских работ по созданию широкого класса цифровых преобразователей перемещений. Высокая степень общности разработанного подхода к математическому моделированию ЦПП позволяет, по мнению авторов, с успехом распространить его на цифровые преобразователи других физических параметров, например, давления жидкости и газа, температуры, объема, расхода веществ и других.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фотоэлектрические преобразователи информации / Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
2. Гитис Э.И., Пискулов Е.И. Аналого-цифровые преобразователи: Учеб. пособ. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1981. 360 с.
3. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: Принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 380 с.
4. Высокоточные угловые измерения / Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин и др.; Под ред. Ю.Г. Якушеникова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
5. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахметжанов, М.А. Габидулин и др.; Под ред. А.А. Ахметжанова. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка. М.: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
8. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1984. 544 с.
9. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи. Под ред. В.Б. Смолова. Л.: Энергия, 1976. 336 с.
10. Гречишников В.М., Конюхов Н.Е. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений со встроенными волоконно-оптическими линиями связи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 160 с.
11. Гречишников В.М. Обобщенная математическая модель оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений со встроенными ВОЛС (ОЦПП — ВОЛС) // Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления. Автоматизация-97: Тез.докл. 1 междунар. научн.-теорет. и практ. конф. Ташкент, 1997. С. 128 – 131.
12. Капустин А.С., Гречишников В.М., Марков П.И. Оценка быстродействия ОЦПУ // Оптоэлектронные и электромагнитные датчики механических величин. Сб.науч.тр. Куйбышев: КуАИ, 1988. С. 61 – 67.