

Таким образом, ОППК с автокоррекцией ИП позволяют получить высокоточные информационные показатели при сравнительно невысоких точностных характеристиках элементов конструкции ОМБ, что значительно упрощает задачи производства и эксплуатации преобразователей.

Литература

1. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла. - М.: Энергоиздат, 1981. - 328 с.

2. Фотоэлектрические преобразователи информации /Под ред. Л.Н.Преснухина. - М.: Машиностроение, 1974.

УДК 620.179.14

А.П.А н д р е е в

СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

Несмотря на многообразие уже созданных ФП, непрерывное увеличение числа и диапазона измеряемых и преобразуемых величин постоянно выдвигает необходимость в разработке новых типов широкодиапазонных, высокоточных, стабильных и надежных ФП, которые могут занимать любое место в сложной цепи преобразований в САУ [1-3].

Современная тенденция развития систем управления с переменной структурой требует создания ФП с регулируемой выходной характеристикой. Использование таких преобразователей позволяет не только улучшить характеристики существующих систем управления, но и открывает новые возможности по созданию адаптивных систем с переменной структурой, причем, изменение алгоритма функционирования системы при одной и той же структурной реализации может осуществляться вручную или автоматически, в зависимости от входных величин или промежуточных результатов.

Введение резервирования преобразователей для повышения надежности по принципу биологических систем позволяет значительно улучшить метрологические характеристики ФП по сравнению с обычными за счет использования структурной избыточности. Проводя одновременно или последовательно несколько измерений одного и того же параметра, в таких системах можно производить математическую об-

работку одновременно по нескольким алгоритмам различной точности, инвариантности, что повышает надежность всей САУ, так как отказ отдельных элементов не приводит к отказу всей системы, а только к переходу на обработку по более упрощенному алгоритму с меньшей точностью.

Широкие возможности синтеза ФП, инвариантных к воздействию возмущений, открывают использование свойств симметрии структуры ФП, состоящих из одинаковых нелинейных элементов.

Предлагаемый структурный метод синтеза ФП, инвариантных к воздействию возмущений, основан на представлении произвольной функции алгебраической суммой одинаковых, но определенным образом смещенных реальных характеристик, нелинейных элементов.

Частным случаем предлагаемого метода являются широко используемые дифференциальные методы измерения, усиления и перемножения сигналов [4, 5].

Известные дифференциальные устройства используют простейший вид симметрии — зеркальную симметрию характеристик нелинейных элементов (НЭ) относительно прямой, проходящей через выбранную рабочую точку [4, 5].

Реализация простейшей вычислительной операции, вычисление разности двух выходных сигналов уже позволяют значительно улучшить линейность и стабильность характеристик дифференциальных преобразователей по сравнению с недифференциальными [4, 5].

Однако теоретически, при условии идеальной симметрии обеих половин дифференциального преобразователя, добиться полной линейности и инвариантности его характеристик к воздействию возмущений можно только при условии, если передаточная характеристика НЭ одной половины дифференциального преобразователя выражается простейшими математическими зависимостями вида $Z = \alpha X$, $Z = \alpha/X$. Если же передаточная характеристика НЭ отличается от простейших, приведенных выше, и выражается степенными полиномами более высоких степеней, простейшей дифференциальной схемой с двумя элементами симметрии уже нельзя получить полную линейность и инвариантность ее к воздействию возмущений, даже при идеальной симметрии обеих половин дифференциального преобразователя. Например, одной разностью нельзя из двух кубических зависимостей получить прямую. В этом случае необходимо реализовать вычислительную структуру с более высоким порядком симметрии, т.е. с большим количеством НЭ.

Предлагаемый метод синтеза ФП основан на реализации формулы

представления произведения N переменных через степенные суммы многочленов $N+1$ степени, полученной и доказанной автором в 1970 г.

$$\prod_{j=1}^n x_j = \frac{1}{2^n n! \alpha_n} \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} \left(\sum_{j=1}^n \pm x_j \right), \quad (I)$$

где $\Phi^{n+1}(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_n x^n + \alpha_{n+1} x^{n+1}$.

Суммы $\sum_{j=1}^n \pm x_j$ образуются путем расстановки знаков "+" и "-" при x_j всеми возможными способами.

Полагая в формуле (I) необходимое количество λ переменными, а остальные постоянными и равными a_1, a_2, \dots, a_{n-1} , получим выражения для линейных, степенных функций и произведения нескольких сигналов, разложенные на различно смещенные по измеряемому параметру, одинаковые реальные характеристики используемых

$$\beta_1 x = \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} [\pm x(t) + a_i]; \quad \beta = 2^n \alpha_n n! \prod_{j=1}^{n-1} a_j;$$

$$\beta_2 x^2 = \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} \left[\sum_{j=1}^2 \pm x_j(t) + a_i \right]; \quad a = \sum_{j=1}^{n-1} \pm c_j;$$

$$\beta_3 x^3 = \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} \left[\sum_{j=1}^3 \pm x_j(t) + a_i \right]; \quad (2)$$

$$\dots$$

$$\beta_n x^n = \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} \left[\sum_{j=1}^{n-m} \pm x_j(t) + a_i \right];$$

$$\beta \prod_{j=1}^m x_j = \sum_{k=1}^{2^n} \pm \Phi^{n+1} \left[\sum_{j=1}^{n-m} \pm x_j(t) + a_i \right].$$

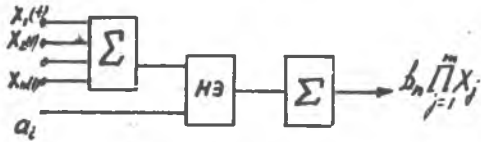
Требуемая функциональная зависимость $F(x)$ может быть получена суммированием выражений (2)

$$F(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x^j. \quad (3)$$

Соотношения (2), (3) реализуются либо последовательно, введением временной избыточности (рис. 1), либо параллельно введением структурной избыточности.

В первом случае постоянные смещения a_i изменяются во времени, а выходной сигнал суммируется в накопителе по требуемому правилу последовательно во времени.

Во втором случае (рис. 2) нелинейные элементы преобразовате-

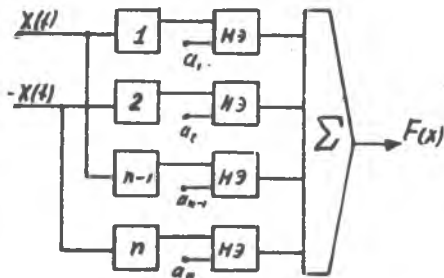


Р и с. 1. Последовательная структура ФП

ля имеет постоянные смещения по измеряемому параметру, а выходные сигналы их суммируются одновременно, в темпе с изменением входных сигналов. В этом случае достигается максимальное быстродействие. Если в формулах (2) положить $a_1, a_2 \dots a_n = a$, то они упрощаются и принимают вид

$$\begin{aligned}
 \theta_1 x &= \sum_{j=1}^{2n} 2 C_{n-1}^j \Phi^{n+1} \left[\pm x(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \pm a \right]; \\
 \theta_2 x &= \sum_{j=1}^{2n} 2 C_{n-1}^j \Phi^{n+1} \left[\sum_{i=1}^2 \pm x(t) + \sum_{i=1}^{n-2} \pm a \right]; \\
 \theta_3 x &= \sum_{j=1}^{2n} 2 C_{n-1}^j \Phi^{n+1} \left[\sum_{i=1}^3 \pm x(t) + \sum_{i=1}^{n-3} \pm a \right]; \\
 &\dots \\
 \theta_m x^m &= \sum_{j=1}^{2n} 2 C_{n-1}^j \Phi^{n+1} \left[\sum_{i=1}^m \pm x(t) + \sum_{i=1}^{n-m} \pm a \right]; \\
 \theta \prod_{j=1}^m x_j &= \sum_{j=1}^{2n} 2 C_{n-1}^j \Phi^{n+1} \left[\sum_{i=1}^m \pm x(t) + \sum_{i=1}^{n-m} \pm a \right].
 \end{aligned} \tag{4}$$

В данном случае для реализации требуемой зависимости достаточно $2N$ нелинейных элементов.



Р и с. 2. Параллельная структура ФП

Полная инвариантность структуры функционального преобразования к возмущениям получается при реализации следующего соотношения

$$B_m X^m = \frac{\sum_{j=1}^n C_{n-1}^j \Phi^n \left[a + \sum_{l=1}^m \pm x(t) + \sum_{l=1}^{n-m} \pm a \right] - \sum_{j=1}^n C_{n-1}^j \Phi^n \left[a - \sum_{l=1}^m \pm x(t) + \sum_{l=1}^{n-m} \pm a \right]}{\sum_{j=1}^n C_{n-1}^j \Phi^n \left[a + \sum_{l=1}^m \pm x(t) + \sum_{l=1}^{n-m} \pm a \right] + \sum_{j=1}^n C_{n-1}^j \Phi^n \left[a - \sum_{l=1}^m \pm x(t) + \sum_{l=1}^{n-m} \pm a \right]} \quad (5)$$

В простейших случаях для нелинейных и линейных элементов преобразователей, имеющих характеристики вида $Z = \alpha/x$ и $Z = \alpha x$, которыми аппроксимируется обычно большое количество датчиков, структура преобразователей выглядит следующим образом, где Z — комплексное сопротивление нелинейных элементов преобразователя (например, обмоток катушки).

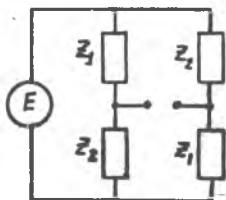
В первом случае для характеристик элементов преобразователя вида $Z = \alpha/x$ данные структурные схемы (рис. 3) и (рис. 4) реализуют следующее соотношение $Z_1 = \alpha/a+x$; $Z_2 = \alpha/a-x$;

$$U_{\text{Вых}} = I_1 Z_2 - I_2 Z_1 = \frac{E(Z_2 - Z_1)}{Z_2 + Z_1} = \frac{E x}{a} = k x; \quad (6)$$

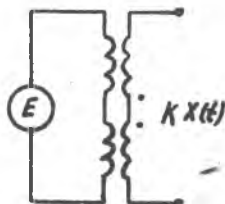
$$\text{при } Z = \alpha x \quad Z_1 = \alpha(a+x), \quad Z_2 = \alpha(a-x);$$

$$U_{\text{Вых}} = \frac{E(Z_1 - Z_2)}{Z_1 + Z_2} = \frac{E \alpha (a+x - a-x)}{\alpha (a+x + a-x)} = \frac{E x}{a} = k x. \quad (7)$$

Оба этих варианта давно известны и хорошо зарекомендовали себя на практике. Все известные дифференциальные преобразователи реализуют полностью или частично приведенные выше соотношения.



Р и с. 3. Мостовая схема ФП.



Р и с. 4. Трансформаторная схема ФП.

При условии идеальной симметрии обеих половин датчика и описания их характеристик простейшими математическими выражениями $Z = \alpha X$; $Z = \alpha/X$ погрешности датчиков от влияния внешних возмущений отсутствуют. Но так как идеальной симметрии в датчиках трудно добиться на практике, наличие погрешностей в дифференциальных преобразователях обычно приписывают только отсутствию полной симметрии обеих половин датчика, не учитывая отличия их реальных характеристик от простейших аппроксимирующих вида $Z = \alpha X$; $Z = \alpha/X$.

При аппроксимации же реальных характеристик степенными полиномами более высоких степеней, простейшей дифференциальной схемой с двумя элементами симметрии уже нельзя устранить влияние возмущений даже при идеальной симметрии обеих половин датчика. В этом случае необходимо синтезировать инвариантные структуры, используя общие условия инвариантности (5), т.е. увеличивать число элементов симметрии в датчиках. С увеличением элементов симметрии в структуре синтезируемого преобразователя возрастает инвариантность его к воздействию возмущений.

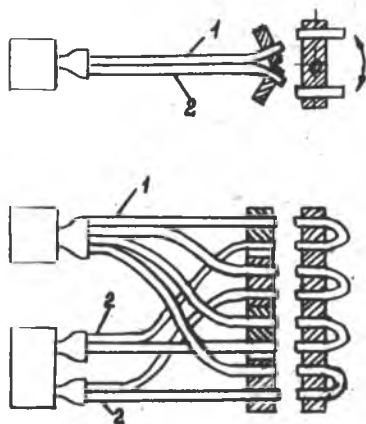
Рассмотрим конкретные примеры выполнения функциональных преобразователей, реализующих предлагаемый метод.

В настоящее время разрабатываются и частично реализованы системы волоконно-оптической связи в ракетах, самолетах, кораблях, контрольно-измерительные комплексы, работающие в условиях сильных электромагнитных и корпускулярных помех. Для этих применений не очень существенно как затухание сигнала, так и его расплывание, но крайне важны, кроме широкополосности, такие замечательные особенности оптической связи, как гальваническая развязка входа и выхода, однонаправленность, отсутствие "коротких замыканий", надежность (обрыв отдельных волокон несуществен), резкое уменьшение массы кабелей по сравнению с медными проводами (на порядок) и потенциально много меньшая стоимость (замена дорогостоящей меди дешевым стеклом, нечувствительность к электромагнитным помехам) [1, 2, 3].

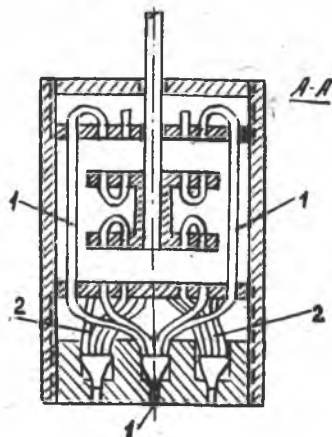
При фотоэлектрических измерениях температуры, расстояний, при изменении световодов для измерения перемещений часто возникает задача линеаризации нелинейных зависимостей световых потоков от расстояний, зазоров, перемещений.

На рис. 5-8 приведены примеры использования для измерений нелинейных зависимостей.

Рис. 6 поясняет принцип работы преобразователя малых переме-



Р и с. 5. Дифференциальный ОП угловых перемещений



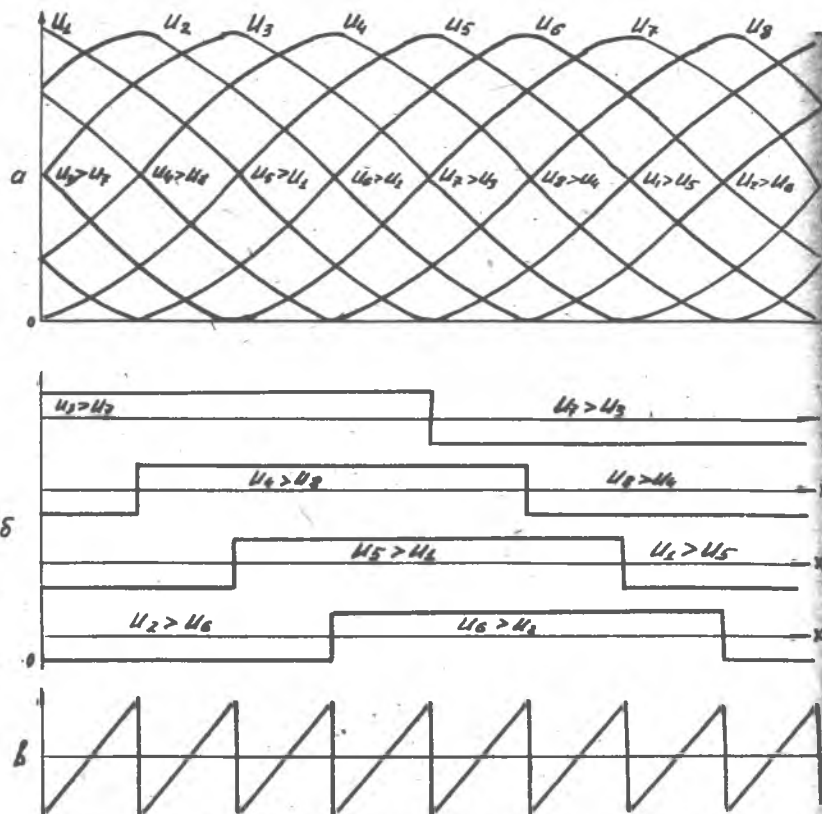
Р и с. 6. Дифференциальный ОП линейных перемещений

шений, основанный на нелинейной зависимости величины светового потока от расстояний между торцами световодов и угла поворота торца одного световода относительно другого.

Ри с. 8 поясняет принцип работы бесконтактного фотоэлектрического преобразователя для измерения больших и малых перемещений.

На рис. 6 - дифференциальный преобразователь малых перемещений, на рис. 5 - дифференциальный преобразователь малых угловых перемещений.

Волоконнооптические преобразователи (см. рис. 5, 6) состоят из передающих световодов 1, смещенных по входному параметру приемных световодов 2. В соответствии с приведенными выше алгоритмами обработки приемные световоды с условно "положительными" сигналами объединяются в один световод, передающий суммарный сигнал на прямой вход дифференциального фотоприемника, а приемные световоды с

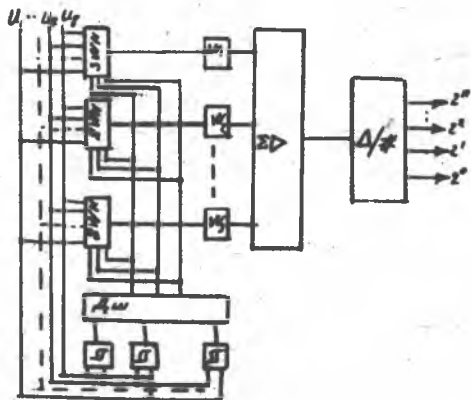


Р и с. 7. Пространственные диаграммы ФП

условно "отрицательными" сигналами объединяются в один световод передающий суммарный сигнал на инверсный вход дифференциального фотоприемника.

В инфракрасном диапазоне для линейных перемещений наибольшая чувствительность без усиления была достигнута 100 мВ/мк в диапазоне (0-0,1 мм) при погрешности нелинейности 0,4%. При измерении угловых перемещений при той же погрешности нелинейности в диапазоне была получена чувствительность 900 мВ/град · 10⁻².

Коммутация многофазных сигналов ФП (см. рис. 8) происходит каждый раз при переключении младшего разряда АЦП угловых перемещений. При этом происходит алгебраическое суммирование многофазных сигналов в соответствии с приведенным выше алгоритмом (4), на которого видно, что с наибольшим весом суммируются те сигналы, у которых в данном интервале большая крутизна, а остальные используются как бы для коррекции их для достижения лучшей линейности выходного сигнала.



Р и с. 8. ФП системы полифазных сигналов

Таким образом, полученный линейно пилообразный выходной сигнал преобразователя позволяет получить дополнительно несколько разрядов двоичного кода и значительно увеличить точность измерений.

Литература

1. Коныхов Н.Е. Электромеханические функциональные преобразователи. - М.: Машиностроение, 1977.
2. Коныхов Н.Е. Оптоэлектронные измерительные преобразователи. - Л.: Энергия, 1977.
3. Шаталов А.С. Функциональные формирователи электрических сигналов. - М.: Энергия, 1974.
4. Гинзбург С.Н. Нелинейные цепи и их функциональные характеристики. - Л.: Энергия, 1958.
5. Харпевич А.А. Умножающие схемы. - Радиотехника, 1954, №3.