УДК 681.335.2

В.А. АЛЕКСЕЕВ

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ БЕЗЭКСЦЕНТРИСИТЕТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ «УГОЛ-ВРЕМЯ-КОД»

Введение

Одна из особенностей современной компьютерной техники заключается в наличии большой памяти и в способности использовать эту память для решения многих задач.

Одним из технических средств памяти является гибкий магнитный диск (ГМД). Известно, что объём памяти на магнитном диске зависит от того, как плотно упакованы сигналы информации на этом диске. Поэтому первостепенное значение приобретают точность нанесения информации, точность позиционирования головок записи (считывания) сигналов на ГМД. До настоящего времени в качестве приводов магнитных головок в дисководах применяются шаговые двигатели (ШД) с вращающимся выходным валом. Поэтому для обеспечения высокой плотности нанесения информации на ГМД и, главным образом, информационной совместимости различных компьютеров по отношению к записи информации на ГМД, требуется измерять точность позиционирования ШД, что и осуществляется с помощью преобразователей „угол-код", работающих в составе специальных измерительных стендов.

Преобразование угла в пропорциональный временной интервал

В системах автоматического управления (САУ), содержащих в контуре управления ЭВМ или микропроцессор, как правило, содержатся аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи формы информации. Существует множество САУ, в которых цифровой эквивалент управляющего воздействия должен быть преобразован в угол поворота вала или линейное перемещение некоторого исполнительного механизма. В обоих указанных случаях в качестве преобразователя код-аналог используются шаговые двигатели (ШД). Схема преобразователя код-аналог с ШД показана на рис. 1.

Погрешность преобразования входного кода в угол поворота зависит от того, с какой точностью выполнен ШД. В тех случаях, когда позволяет быстродействие САУ и ШД сочленяется с понижающим редуктором, погрешности позиционирования уменьшаются пропорционально передаточному числу редуктора. Однако не всегда по условиям быстродействия системы можно снизить погрешности преобразования путём использования понижающего редуктора. Для ряда систем, в которых используются приводы с ШД быстродействие привода является решающим фактором. Поэтому для таких систем используют прецизионные двигатели с очень высокой точностью позиционирования. Условия изготовления аппаратуры, в которой используются эти двигатели, таковы, что для исключения брака каждый из двигателей, поступающих на сборку, должен пройти проверку на точность позиционирования.

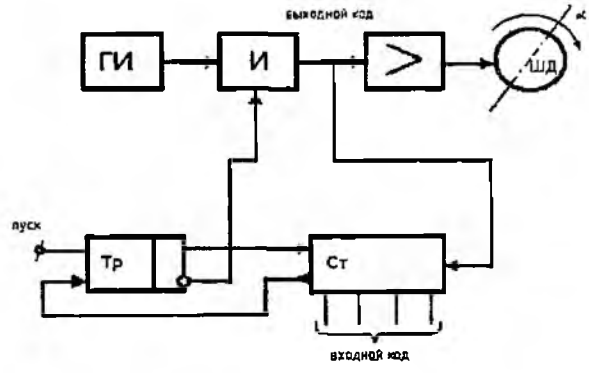

Рис. 1

К числу систем, где используются прецизионные ШД, относятся дисководы ПЭВМ, где ШД использован в качестве привода магнитной головки. Магнитная головка сочленяется с

валом ШД посредством металлической ленты, наматываемой на барабан ШД. Отсюда становится понятным, что в данном случае погрешности позиционирования ШД (неодинаковость шагов ШД), эксцентриситет барабана, эксцентриситет вала ШД полным весом переносится на точность позиционирования магнитной головки дисковода.

Из приведенного анализа [1] следует, что все рассмотренные соединения валов не освобождают систему вал-преобразователь от погрешностей сочленения. Особенность этих погрешностей состоит в том, что они не поддаются формализации (математическому описанию) и потому не могут быть учтены введением математической обработки при помощи микропроцессорных устройств. Кроме того, сами такие соединения достаточно сложны и требуют тонких технологий для их осуществления.

Вместе с тем известны разработки преобразователей плоского угла в пропорциональный временной интервал и цифровой эквивалент на основе электромеханической развертки [2, 3, 4], которые обладают достаточной точностью преобразования и сравнительно легко реализуются при помощи доступных серийно выпускаемых отечественной промышленностью элементов. Кроме того, в таких преобразователях можно осуществить оптическую стыковку валов и обеспечить автоматическое устранение эксцентриситета.

Преобразователь информации угол-время-код (ПУВК) с развертыванием угла в интервале времени является наиболее простым средством преобразования плоского угла в цифровой эквивалент. Это вытекает из рассмотрения рис. 2 и 3 (на рис. 2 показан преобразователь угол-время-код: Д – электродвигатель, 1 – маховик, 2 – метка, 3 – датчик стартимпульсов, 4 – датчик стопимпульсов, F_1, F_2 - формирователи импульсов, Тр – триггер, SИ – схема совпадения импульсов, G – генератор, Ст – счетчик импульсов. На рис. 3 – временная диаграмма сигналов в ПУВК. *а*, *б* – последовательность стартимпульсов, *в*, *г* – последовательность стопимпульсов, *д* – последовательность квант. импульсов, *ж* – последовательность кодирующих импульсов).

Электрический двигатель Д с постоянной скоростью ω вращает маховик 1, на поверхности которого имеется активная метка 2, которая поочередно обегает датчики стартовых и стоповых импульсов 3, 4, и с выходных сигналов которых формирователи F_1 и F_2 формируют остроконечные импульсы (см. рис. 3 *а*, *б*, *в*, *г*).

Стартовые и стопимпульсы при помощи триггера образуют строб-импульс (рис. 3 *е*), длительность которого

$$\tau_\varphi = \frac{\varphi}{\omega}. \tag{1}$$

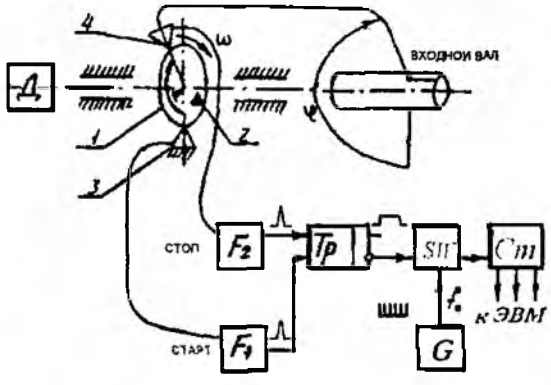

Рис. 2

В течение длительности импульса τ_φ через схему совпадений SИ с генератора G в счетчик Ст поступают квантующие импульсы частоты f_0 (рис. 3, *д*), образуя код $N\varphi$ (рис. 3, *ж*)

$$N_\varphi = \tau_\varphi \cdot f_0. \tag{2}$$

с учетом (1) и (2)

$$\varphi = \frac{\omega N_\varphi}{f_0}. \qquad (3)$$

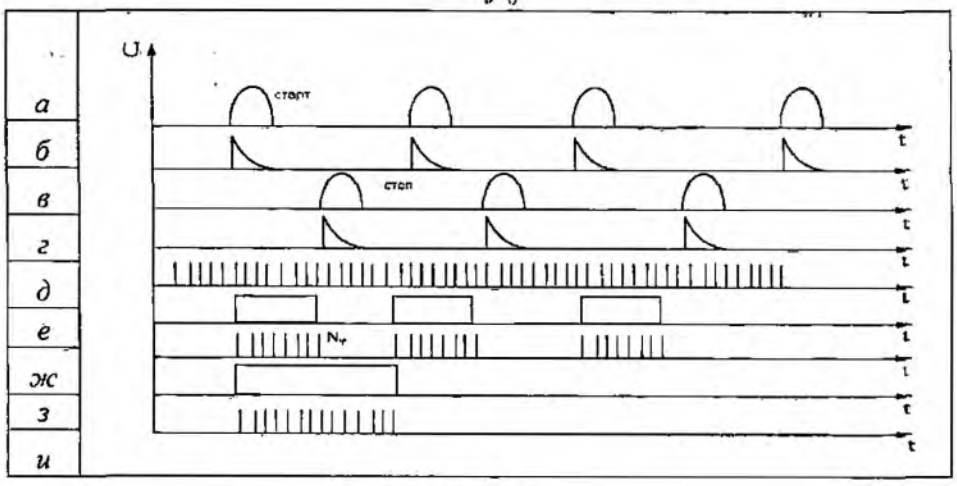

Рис. 3

Особенность такого преобразования состоит в кажущейся чрезвычайной простоте его реализации. Действительно, преобразование угла в пропорциональный временной интервал осуществляется электромеханически, а полученный временной интервал сравнительно просто и с высокой точностью преобразуется в цифровой эквивалент. Причём, точность последнего преобразования достаточно высока благодаря наличию точных эталонов времени [5]. Таким образом, в ПУВК отсутствует один чрезвычайно важный элемент – пространственная шкала для измерения угла, которую ранее называли лимбом [6], а в нашем случае – кодовым диском [7]. Изготовление высокоразрядных кодовых дисков представляет собой сложную техническую проблему [7].

Для того чтобы ПУВК имел высокую точность преобразования, необходимо тщательно исследовать и минимизировать до необходимого уровня погрешности преобразования. На рис. 3 представлена временная диаграмма стартовых и стоповых сигналов и временного интервала между ними с последующим его времяимпульсным заполнением. Предварительный анализ погрешностей преобразования начнем со средств формирования стартовых и стоповых сигналов и их погрешностей.

В качестве стартовых и стоповых сигналов можно использовать различные активные пары: контактную, магнитную и оптопару. Механическая конструкция контактного датчика не позволяет рассчитывать на удовлетворительную работу в условиях наличия вибрации, ударов. Кроме того, контактные пары изнашиваются в процессе эксплуатации и сильно меняют свои физические характеристики.

Магнитные датчики, благодаря отсутствию механического контакта, нашли широкое применение в целом ряде устройств, но особенно значительный прогресс в создании магнитных датчиков произошел в связи с развитием памяти ЭВМ. Запоминающие устройства на магнитных лентах, барабанах и дисках в настоящее время работают с плотностью записи много выше 40 *бит/мм*. Легко достижимы плотности 100 *бит/мм*. Считается, что теоретический предел находится в области 8000 *бит/мм* [8]. Если, например, кодовый диск имеет диаметр 100 *мм*, а плотность записи по внешней дорожке составляет хотя бы 1000 *бит/мм*, то каждому биту информации соответствует угол приблизительно 4 угловые секунды. Но в преобразователях угол-время-код использовать магнитные пары с такой разрешающей способностью не представляется возможным, вследствие наличия проблемы удержания головки записи-считывания на постоянном, малом расстоянии над вращающимся с большой скоростью маховиком. Эта проблема решена в устройствах памяти ЭВМ. Но там условия эксплуатации системы диск – головка стационарны.

Наиболее подходящими датчиками стартовых и стоповых элементов являются оптопары. В фотоэлектрических преобразователях угол – код на диске диаметром около 150 *мм* можно различать свыше 5000 *бит*. Но в ПУВК стартовый и стоповый сигналы образуются в результате сканирования черно-белой границы. Ток сигнала является линейной функцией перемещения апертуры. Протяженность переходной характеристики определяется продольным размером апертуры [9]. Поэтому реальную протяженность передних фронтов сигналов в ПУВК можно определить из выражения

$$\tau = \frac{\alpha}{R\omega}, \tag{4}$$

где α – продольный размер апертуры, R – радиус маховика, $\omega = 2\pi fp$ – угловая скорость маховика.

Так, например, при $\alpha = 0{,}1$ *мм*, $R = 50$ *мм*, $\omega = 314$ 1/*с*, $\tau = 6$ *мкс*, что в угловых секундах составляет 400´´.

Использование в качестве стартовых и стоповых датчиков оптопары предпочтительно по многим причинам: упрощается юстировка, пара не изнашивается механически. По сравнению с магнитными датчиками конструкция оптического датчика дешевле и т.п. Однако для обеспечения высокой разрешающей способности требуется привязка шкалы квантующих импульсов к характерной точке рабочего сигнала, что может быть обеспечено с погрешностью 10^{-9}с, что в пересчете к угловой мере существенно меньше одной угловой секунды.

Вторая составляющая общей погрешности ПУВК – погрешность квантовая. Погрешность квантовая ПУВК, равно как и других цифровых приборов, достаточно хорошо изучена [7]. Здесь мы отметим, что при построении ПУВК с электромеханической разверткой достаточный минимум погрешности квантования может быть обеспечен сравнительно простыми средствами. Если например, частота развертывающей функции составляет 50 *Гц* и число пар полюсов синхронного развертывающего электродвигателя равно единице, то период развертывающей функции равен 20*с*. Чтобы обеспечить шаг квантования равный угловой секунде, необходим шаг квантования по времени $Tкв = 2 \cdot 10^{-2} / 1{,}296 \cdot 10^{6} = 1{,}54 \cdot 10^{-8}$*с*, т.е. частота квантования $fкв \leq 6{,}5 \cdot 10^{7}$ *Гц*. При частоте развертывания 400 *Гц*, для односекундного ПУВК частота квантования около 500 *МГц* может быть обеспечена элементами ЭСЛ логики [10]. Ещё меньший шаг квантования в ПУВК может быть обеспечен при помощи кольцевых газовых лазеров (КГЛ) [11].

Кроме рассмотренных погрешностей необходимо иметь ввиду погрешность от неравномерного вращения развертывающего двигателя и погрешность эксцентриситета, присущую всем типам преобразователя угол-код.

Предварительный анализ показывает, что использование электрического двигателя с маховиком, выполняющим роль механического фильтра, и использование автоколлимационных методов фиксации угла [11], позволит минимизировать до необходимого уровня и эти две погрешности.

Две разновидности ПУВК

Совместное рассмотрение процессов квантования и дискретизации позволяет построить две разновидности ПУВК: основанных на совпадениях импульсов регулярных импульсных потоков и на использовании принципа приближения иррациональных чисел подходящими дробями.

Развертывающий преобразователь «угол-время-код», построенный по методу приближения подходящими дробями, показан на рис. 4.

Схема его по сравнению со схемой рис. 1 дополнена вторым каналом для преобразования в код периода развертывающей функции и осреднения многократных измерений. Преобразователь работает следующим образом: электродвигатель 1, на валу 2 которого укреплен маховик 3, приводит последний во вращение. Стартовые и стоповые импульсы, вырабатываемые датчиками 5 и 6, поступают соответственно на формирователи F1 и F2. Сформированный старт-импульс «переводит» триггеры Тр1 и Тр2 из состояния «0» в состояние «1» и таким

образом через схемы совпадения &1 и &2 импульсы квантования с генератора G поступают в счетчики Ст1 и Ст2, образуя там за n циклов коды $\sum_{i=1} N\varphi i$ и $\sum_{i=1} Npi$ соответственно. Количество циклов определяется объемом счетчика стоповых импульсов Ст3. После n-го стопового импульса триггер Тр3 переходит в состояние «0», прекращая тем самым поступление квантующих импульсов в счетчик Ст2. В этот момент блокируется и триггер Тр1 по схеме, не показанной на рис. 4. Результат измерения определяется в соответствии с выражением

$$\varphi = 2\pi \sum_{i=1}^{n} N\varphi i / \sum_{i=1}^{n} Npi. \qquad (2)$$

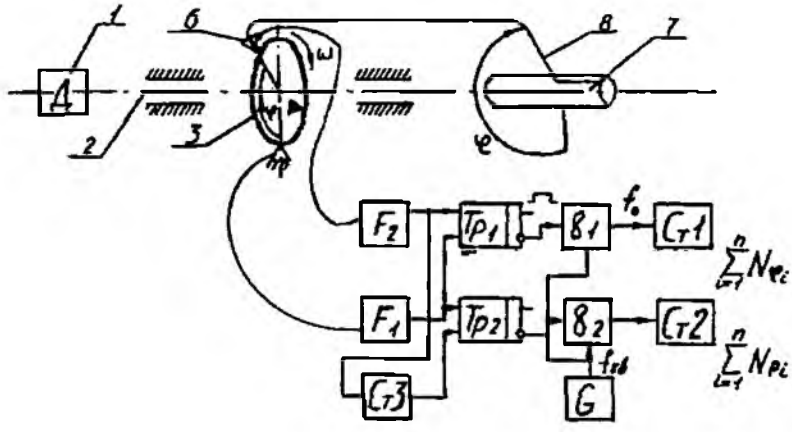

Рис. 4

Анализ методических погрешностей ПУВК показал, что использование принципа приближения иррациональных чисел подходящими дробями предпочтительнее ввиду простоты его технической реализации. Проведенный анализ погрешностей позволил осуществить выбор основных элементов ПУВК, обеспечивающих заданную точность преобразования (датчики стартовых и стоповых импульсов, развертывающий элемент).

Установлено, что в ПУВК второй разновидности погрешность от квантования убывает пропорционально количеству осреднений n, в отличие от классического метода осреднений, где погрешность от квантования понижается пропорционально $\sqrt{n}$ (таблица, рис. 5).

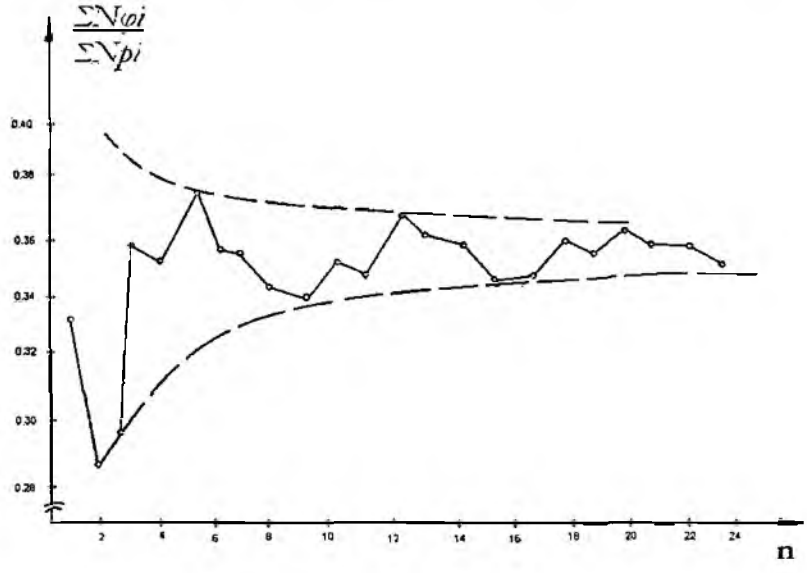

Рис. 5

n	$N\varphi i$	Npi	$\Sigma N\varphi i$	ΣNpi	$\frac{\Sigma N\varphi i}{\Sigma Npi}$
1	1	3	1	3	0.333
2	1	4	2	7	0.2850
3	1	3	3	10	0.3000
4	2	4	5	14	0.357
5	1	3	6	17	0.352
6	2	4	8	21	0.380
7	1	4	9	25	0.360
8	1	3	10	28	0.357
9	1	4	11	32	0.343
10	1	3	12	35	0.342
11	2	4	14	39	0.358
12	1	3	15	42	0.357
13	2	4	17	46	0.369
14	1	4	18	50	0.360
15	1	3	19	53	0.358
16	1	4	20	57	0.350
17	1	3	21	60	0.350
18	2	4	23	64	0.359
19	1	3	24	67	0.358
20	2	4	26	71	0.366
21	1	4	27	75	0.360

Выводы

На основе проведенного предварительного анализа можно сделать вывод о том, что при соблюдении определенных условий проектирования можно построить ПУВК, обладающий высокой точностью преобразования, при быстродействии, достаточном для решения многих практических задач, в том числе и задачи оценки точности позиционирования ШД. Для реализации её необходимо создание оптоэлектронных сканирующих безэксцентриситетных преобразователей информации угол-время-код, способных наиболее полно удовлетворить требования, предъявляемые к контролю позиционирования шаговых двигателей.

Для достижения этой цели необходимо:

- создать математическую модель развертывающего аналого-цифрового преобразователя угол-код с промежуточным преобразованием угла во временной интервал;
- детально исследовать погрешности преобразования, на основании чего сформулировать требования на проектирование элементов и узлов высокоточного ПУВК.

Провести экспериментальное исследование ПУВК с целью проверки теоретических построений и внедрения его в промышленную эксплуатацию.

Список литературы: 1. *Преснухин Л.Н.* Фотоэлектрические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 1974. 432с. 2. *Тырса В.Е.* Исследования преобразователей информации угол-время-код: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 1969 / Харьков. ин-т радиоэлектроники. 3. *Костюков О.А.* Синтез принципов построения и конструирования преобразователей угол-время-код с квазиравномерными системами датчиков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 1977 / Харьков. политехн. ин-т. 4. *Федотов Д.А.* Преобразователи угла поворота вала в код с управляемой кольцевой разверткой. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 1982 / Харьков. политехн. ин-тут. 5. *Темников Ф.Е.* Метод динамической компенсации в автоматике и телемеханике // Электричество. 1948. №3. 6. *Темников Ф.Е.* Метод и модели развертывающих систем. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1987. 136с. 7. *Преснухин Л.Н.* Фотоэлектрические преобразователи информации. М.:Машиностроение, 1974. 432с. 8. *Рыжевский А.Г., Щляндин В.М.* Некоторые перспективы структурного совершенствования аналого-цифровых преобра-

зовтелей частотно-временной группы // Труды симпозиума «Проблемы создания преобразователей формы информации». Киев, 1970. 9. *Кудрявцев В.Б.* и др. Прецизионные преобразователи электрических сигналов и угловых перемещений на принципах квантовой магнитометрии. М.: Энергия, 1971. 10. *Рабинович В.И.* и др. Информационные характеристики средств измерения и контроля. М.: Энергия, 1998. 11. *Маликов М.Ф.* Основы метрологии. Ч.1. Учение об измерении. М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1999.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.05.2009