

Методы контроля погрешности преобразования одноотсчетных и двухотсчетных высокоточных амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа

© А.А. Бошляков, Е.В. Ипполитова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены методы контроля точности преобразования одно- и двухотсчетных амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа с максимальными значениями погрешности преобразования на уровне десятков угловых секунд и единиц или долей угловых секунд.

Ключевые слова: амплитудный цифровой преобразователь угла следящего типа, погрешность преобразования, методы контроля.

Важнейшие элементы цифровых систем управления угловым положением подвижных частей объекта регулирования – цифровые преобразователи угла (ЦПУ), так как их технические характеристики в значительной степени определяют технические характеристики системы управления в целом. При этом широкое распространение получили амплитудные ЦПУ следящего типа, которые путем функционального цифро-аналогового преобразования реализуют тригонометрическую зависимость вида [1]

$$\sin \alpha \cos 2\pi N - \cos \alpha \sin 2\pi N = 0,$$

где α – текущее угловое положение ротора датчика угла (ДУ) в пределах электрического периода; N – изменяемый код, обеспечивающий выполнение указанного соотношения. Полученный код N представляет собой требуемое значение выходного кода ЦПУ, эквивалентное текущему значению углового положения α . Задача количественной оценки погрешности преобразования будет актуальной всегда так же, как и достоверность проведенной оценки.

Реализовать рассмотренную выше строгую тригонометрическую зависимость технически сложно, а переход к приближениям той или иной степени точности приводит к появлению погрешности преобразования угла в код. В работе [2] представлена обобщенная математическая модель (ОММ) амплитудного ЦПУ следящего типа, позволяющая с минимальными временными затратами вычислять погрешность преобразования при различных задаваемых отличиях от синусно-косинусных зависимостей как в части датчика угла, так и в части функциональ-

ного цифро-аналогового преобразования. С помощью этой модели также можно оценить эффективность применения коррекции начальной погрешности преобразования определенного вида. Использование ОММ на этапе разработки ЦПУ дает возможность с малыми временными затратами оценивать сотни вариантов построения зависимости с неидеализированными элементами и выбирать те структуры, которые потенциально обеспечивают заданную точность преобразования.

Результаты вычисления конечной погрешности преобразования (максимальное значение около $0,5''$) и начальной погрешности преобразования (максимальное значение приблизительно $3000''$) амплитудного одноотсчетного ЦПУ следящего типа с квазисинусоидальным ДУ приведены на рис. 1. Повышение точности преобразования обеспечивается использованием специальных блоков коррекции. На рисунке также представлен характер изменения амплитудных значений выходных напряжений ДУ. С учетом полученного значения конечной погрешности преобразования можно фактически установить требования, которые необходимо предъявлять к аппаратуре контроля высокоточных ЦПУ.

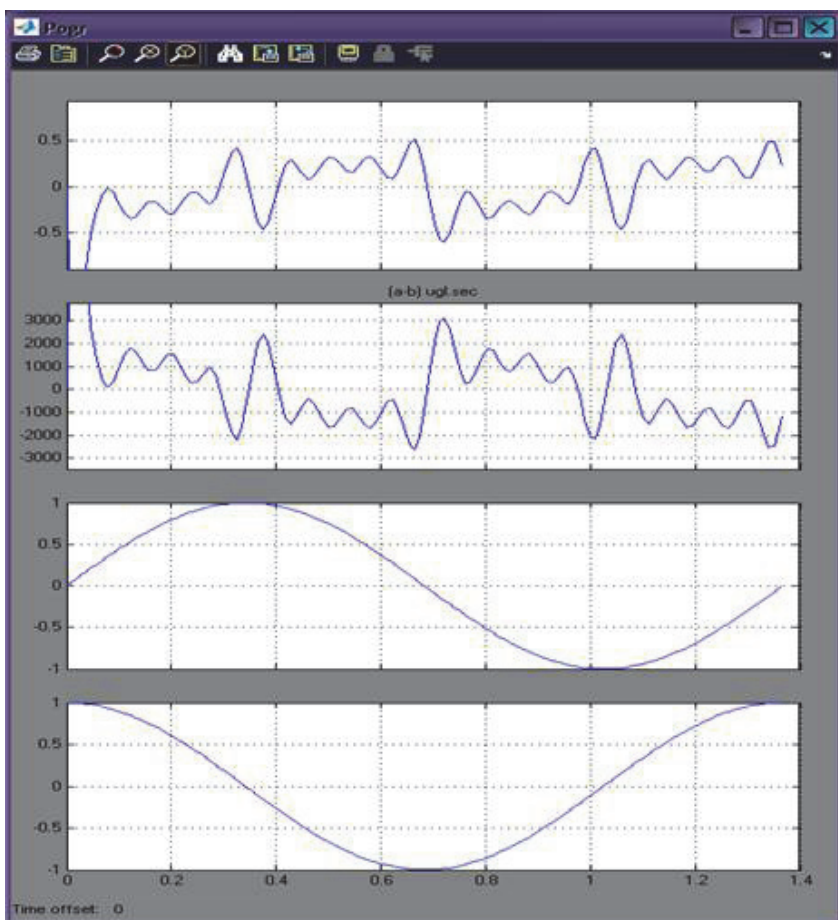


Рис. 1. Результаты математического моделирования

Однако исследование характеристик ЦПУ с помощью ОММ не отменяет необходимости проведения прямых испытаний образцов ЦПУ того или иного класса точности. Решению этой задачи уделено много внимания (например, работа [3]). Наибольшее распространение получили классические методы испытаний, основанные на применении различных угломерных устройств (оптических делительных головок, теодолитов, оптических призм и электронно-механических призм). К классическим методам следует отнести методы контроля с помощью эталонных ЦПУ любого вида построения, которые позволяют в определенной мере автоматизировать испытания. Использование указанных методов требует последовательного во времени выполнения следующих операций:

- задание массива контрольных угловых положений ($\alpha_{\text{контр}}$) ротору ДУ, входящего в состав испытуемого ЦПУ;
- формирование расчетного массива кодов, соответствующих идеальному преобразованию углового положения в код ($N_{\text{расч}}$);
- измерение и фиксация массива реальных выходных кодов проверяемого ЦПУ ($N_{\text{изм}}$), соответствующих контрольным угловым положениям;
- вычисление массива разностных величин ($\Delta N = N_{\text{расч}} - N_{\text{изм}}$) и алгоритмическая обработка этого массива, позволяющая оценить погрешность преобразования.

Возможная погрешность задания массива угловых положений ($\alpha_{\text{контр}}$) приводит к появлению нежелательной составляющей в определяемой погрешности преобразования. Следует отметить, что отечественная оптическая делительная головка ОДГ-5, используемая для задания массива контрольных положений, имеет разрешающую способность 5", а теодолит типа 2Т2А – 1". Таким образом, значение погрешности задания массива контрольных угловых положений превышает требуемые значения в несколько раз. Согласно изложенному, можно сделать следующий вывод: для определенного класса точности одноотсчетных ЦПУ еще можно использовать головку ОДГ-5, а для двухотсчетных ЦПУ уже требуется применение теодолитов или призм.

Кроме указанных ограничений необходимо также отметить, что эксплуатационные характеристики угломерных устройств оптического типа ограничивают температурный диапазон внешнего воздействия, а при больших массивах контрольных угловых положений приводят к значительным временным затратам. К дополнительным временным затратам относятся и временные интервалы для точного механического соединения испытуемого ДУ и угломерного устройства.

Специальные установки для контроля погрешностей преобразования одноотсчетного 16-разрядного ЦПУ с серийным ДУ типа 5БВТ

повышенного класса точности и для контроля двухотсчетного 22-разрядного ЦПУ с ДУ грубого отсчета типа 5БВТ, а также специального встраиваемого индукционного ДУ точного отсчета с коэффициентом электрической редукции 64 приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Специальные установки для задания массива контрольных угловых положений ДУ одноотсчетного 16-разрядного (а) и двухотсчетного 22-разрядного ЦПУ (б)

В датчик угла 5БВТ входит оптическая делительная головка ОДГ-5. При этом корпус (статор) 5БВТ с помощью специального приспособления механически соединяется со шпинделем головки ОДГ-5, на роторе установлен диск, который фиксируется в определенном угловом положении по отношению к корпусу головки ОДГ-5 и, следовательно, по отношению к статору ДУ 5БВТ. При такой компоновке требуемые контрольные угловые положения задаются разворотом статора ДУ 5БВТ относительно его ротора в соответствии с учетом показаний лимбов головки ОДГ-5. Применение в конструкции установки диска будет обосновано при последующем рассмотрении метода экспресс-контроля погрешности преобразования. Указанные установки проектировались так, чтобы они могли с небольшим видоизменением контролировать погрешность преобразования классическим методом и новым методом экспресс-контроля.

При испытаниях конкретного макетного образца одноотсчетного 16-разрядного амплитудного ЦПУ следящего типа классическим методом зафиксирована максимальная суммарная погрешность преобразования менее $2'$. В пределах полного периода изменения выходных напряжений ДУ 5БВТ (360°) оператор задавал 64 равноудаленных контрольных угловых положения. Соответствующие выходные двоичные коды проверяемого ЦПУ фиксировались специальным внешним табло.

Точностные характеристики испытанного образца указывают на допустимость использования головки ОДГ-5 для контрольных испытаний. Для контроля более точных ЦПУ необходимо переходить к методам измерения, применяемым для работы с двухотсчетными ЦПУ. Отметим, что временные затраты на проведение испытаний составили приблизительно 90 мин.

Установка, приведенная на рис. 2, б, разработана для испытаний макетного образца двухотсчетного 22-разрядного ЦПУ. В качестве ДУ грубого отсчета использован серийный СКВТ типа 5БВТ, а в качестве ДУ точного отсчета – специальный электромеханический ДУ точного отсчета встраиваемого типа со значительными линейными размерами. Датчик точного отсчета имеет сосредоточенные обмотки и коэффициент электрической редукиции 64. Такое построение датчика обеспечивает идентичность зависимостей всех электрических периодов от угла ДУ точного отсчета, поэтому погрешность преобразования в пределах одного электрического периода с требуемой достоверностью характеризует погрешность преобразования в пределах полного оборота ротора ДУ. Установка спроектирована с учетом контроля высокой конечной точности преобразования, но в настоящее время в составе ЦПУ отсутствует блок коррекции и измеряется только начальная погрешность преобразования.

Для проведения контрольных испытаний на соответствующей установке (в ее верхней части) размещается оптосин. Его синусно-косинусные выходные сигналы имеют 4096 периодов изменения за один оборот ротора. С его помощью можно задавать контрольные угловые положения с погрешностью около десятых долей угловой секунды. Указанная точность задания контрольных угловых положений будет обеспечиваться, если использовать угловые положения, которые соответствуют началам электрических периодов (нулевые положения) выходного напряжения оптосина. При испытаниях в пределах электрического периода ДУ точного отсчета задавалось 64 контрольных угловых положения.

В установке корпус оптосина жестко связан со статором ДУ точного отсчета, а вал оптосина через высокоточную соединительную муфту – с ротором ДУ точного отсчета. При проведении статических измерений оператор с помощью микрометрических винтов последовательно во времени устанавливает ротор ДУ точного отсчета в требуемые контрольные угловые положения, учитывая текущие значения выходных сигналов оптосина. Для каждого значения углового положения вычислялась искомая погрешность преобразования. При таком методе испытаний погрешность соединительной муфты на практике не искажает результаты измерения. В результате испытаний зафиксирована начальная погрешность преобразования углового положения в код, не превышающая 8", с характером изменения в пределах электрическо-

го периода, близким к четвертой гармонике. Из теории построения ЦПУ рассматриваемого вида известно, что погрешность определяется наличием третьей (пятой) пространственной гармоники в выходных зависимостях ДУ точного отсчета, а задействование соответствующего блока коррекции повышает конечную погрешность преобразования более чем в 10 раз. Временные затраты контроля погрешности такого ЦПУ с 64 контрольными угловыми положениями в пределах электрического периода ДУ точного отсчета составляют порядка 90 мин.

Ограничения по температуре окружающей среды и по некоторым видам внешних воздействий, связанные с использованием угломерных устройств; значительные временные затраты; неприменимость таких методов в эксплуатационных условиях без демонтажа ДУ из состава объекта управления потребовали поиска новых методов испытаний. Такой метод, названный методом экспресс-контроля погрешности преобразования, разработан и апробирован в ОММ и на указанных в настоящей статье макетных образцах одноотсчетного и двухотсчетного ЦПУ.

Метод основан на теоретических положениях, изложенных в работе [4]. Показано, что при вращении ротора двухфазного ДУ амплитудного ЦПУ следящего типа с определенной угловой скоростью изменяющиеся во времени ординаты входного напряжения ($U_{вх}$) постоянного тока преобразователя напряжения в частоту следования импульсов содержат в скрытом виде информацию о текущей погрешности преобразования углового положения в код. Последующими исследованиями определены условия, обеспечивающие преобразование указанного напряжения в сигнал, достоверно характеризующий текущую погрешность преобразования углового положения в код. К этим условиям следует отнести: максимально возможную минимизацию указанной угловой скорости; стабилизацию этой скорости на требуемом уровне на время прохождения одного (двух) электрических периодов ДУ из состава проверяемого ЦПУ. При использовании формируемого контрольного сигнала только для оценки текущей погрешности преобразования перечисленные условия в определенной мере могут быть ослаблены.

Для формирования точного искомого контрольного сигнала в процессе вращения ротора ДУ необходимо выполнить следующие операции:

- исключение из сигнала постоянной величины $U_{вх}$, значение которой определяется текущей угловой скоростью вращения ротора ДУ;
- интегрирование функции, представленной в виде выделенной переменной во времени составляющей сигнала $U_{вх}$;
- представление результатов интегрирования в виде, удобном для регистрации и дальнейшего использования.

Результаты измерения погрешностей преобразования одноотсчетного и двухотсчетного ЦПУ, полученные методом статического измерения и методом экспресс-контроля, приведены на рис. 3.

При реализации метода экспресс-контроля 16-разрядного ЦПУ в рассмотренном выше устройстве измерения статической погрешности преобразования отключалось торможение инерционного диска и ручным способом задавался начальный импульс его вращения. Инерциальные возможности диска при заданной угловой скорости вращения обеспечивали необходимую степень стабилизации этой скорости. С помощью двухлучевого запоминающего осциллографа фиксировались сигнал в виде напряжения постоянного тока, формируемый по представленному алгоритму и характеризующий погрешность преобразования, и двухуровневый дискретный сигнал, отображающий прохождение одного электрического периода.

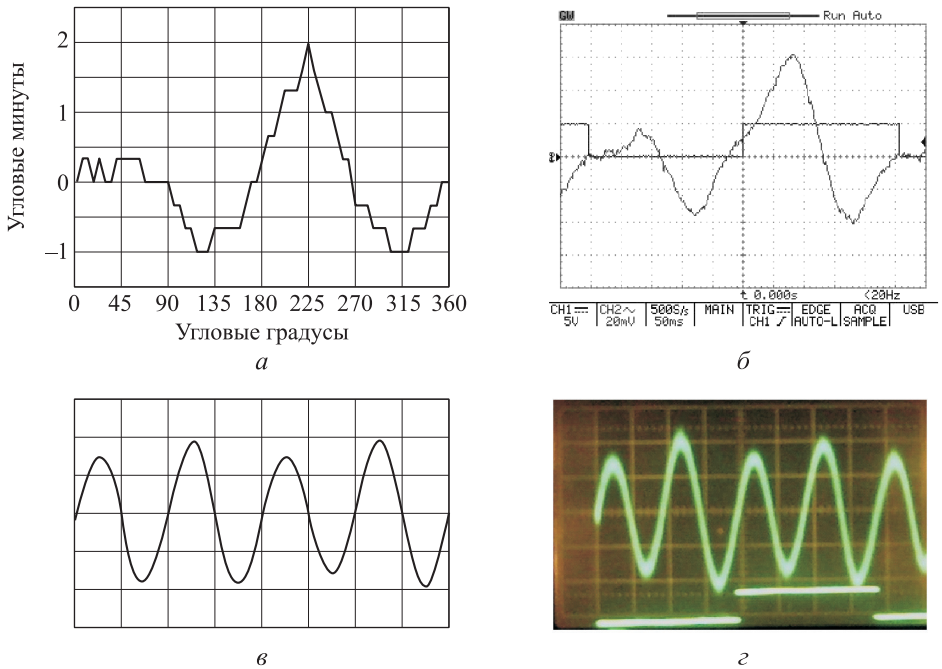


Рис. 3. Результаты измерения погрешностей преобразования одноотсчетного 16-разрядного (а, б) и двухотсчетного 22-разрядного ЦПУ (в, г) классическим методом (а, в) и методом экспресс-контроля (б, г)

При измерении начальной погрешности преобразования 22-разрядного ЦПУ в соответствующей установке демонтировался узел микрометрического изменения углового положения ротора ДУ, т. е. установка переводилась в режим, допускающий перемещение ротора ДУ на неограниченный угол. Указанное вращение ротора ДУ осуществлялось простейшим приводом, с помощью которого задавалась начальная скорость вращения ротора и нейтрализовалось влияние момента трения подшипников на время измерений. С учетом значительного момента инерции ротора ДУ и малого времени измерения (время прохождения до углового диапазона порядка 10°) использование дополнительной инерционной массы не требовалось. Измеряемые сигналы подавались на соответствующий канал осциллографа.

ющие входы двухлучевого осциллографа. Один луч представлял собой характер изменения сформированного контрольного сигнала погрешности преобразования по времени (по углу), а другой – дискретный сигнал прохождения одного электрического периода. Изображение сигналов на экране осциллографа фиксировалось фотоаппаратурой.

Рассмотренные результаты измерений позволяют сделать следующий вывод: дальнейшая проработка метода экспресс-контроля позволит создать инструмент, необходимый для контроля характеристик высокоточных амплитудных ЦПУ следящего типа как в процессе их производства, так и в условиях эксплуатации. Кроме того, возможна разработка самонастраивающихся ЦПУ, в которых контрольный сигнал используется в качестве сигнала коррекции начальной погрешности преобразования. Это обеспечит в автоматическом режиме поддержание требуемой точности преобразования на заданном уровне в процессе всего срока эксплуатации ЦПУ, несмотря на негативное воздействие внешних факторов и эффекта временного старения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вульвет Дж. *Датчики в цифровых системах*. А.С. Яроменка, ред.; пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1981, 200 с.
- [2] Бошляков А.А., Домрачев В.М., Ипполитова Е.В. Обобщенная математическая модель амплитудного цифрового преобразователя угла следящего типа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, с. 88–94.
- [3] Домрачев В.М., Мерзляков Ю.В., Сигачев И.П., Сеницын А.П. Устройство контроля цифровых преобразователей угла. *Измерительная техника*, №3, 1996, с. 19–20.
- [4] Воронин Н.Н., Домрачев В.М., Сигачев И.П., Тимашов Н.А. Способ определения погрешностей цифровых преобразователей угла следящего типа с двухфазными датчиками угла. *Измерительная техника*, № 6, 2004, с. 10–12.

Статья поступила в редакцию 19.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

А.А. Бошляков, Е.В. Ипполитова. Методы контроля погрешности преобразования одноотсчетных и двухотсчетных высокоточных амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/932.html>

Бошляков Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области проектирования высокоточных мехатронных модулей.
e-mail: boshlyakov@mail.ru

Ипполитова Евгения Викторовна – аспирант, ассистент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области цифровых преобразователей угла.