

УДК 681.586:007.2(035.5)

**Повышение точности и расширение функциональности цифровых преобразователей
угла**

Е.В. Ипполитова

*Аспирант, кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Бошляков А.А., к.т.н., доцент кафедры «Специальная
робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
luve@mail.ru

Цифровые преобразователи угла (ЦПУ) применяются в цифровых системах управления (ЦСУ) для выполнения режима программного наведения по углу. Относительно широкое распространение получили ЦПУ следящего типа с амплитудным преобразованием в двоичный код выходных сигналов 2-фазных электромеханических индукционных датчиков угла (ДУ) [1]. В одноотсчетном варианте построения они обеспечивают преобразование в код углового положения ротора (вала) ДУ с погрешностью порядка нескольких угловых минут, а в двухотсчетном - порядка 10 угловых секунд при коэффициенте электрической редукции ДУ точного отсчета (ДУТО) равном 64 (128).

Использование преобразования следящего типа позволяет обеспечивать астатизм второго порядка и формировать сигнал, с той или иной степенью точности характеризующий текущую скорость вращения ротора (вала) ДУ, использование которого в некоторых случаях позволяет исключать из состава ЦСУ традиционно используемую тахомашину постоянного тока.

Повышение точности преобразования таких одноотсчетных и 2-отсчетных ЦПУ, а также дальнейшее развитие многофункциональности, расширит возможности

разработчиков новых ЦСУ в части выбора типа ЦПУ и будет способствовать решению задачи замещения импортной элементной базы на отечественную.

В данной статье представлены результаты работы по совершенствованию амплитудных ЦПУ следящего типа.

Исследованиями подтверждена целесообразность использования в ЦПУ электромеханических индукционных ДУТО с электрической редукцией с сосредоточенными обмотками, построенными по системе "зубец-полюс" [1]. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что конструкция ДУТО такого типа и освоенная технология их изготовления, при коэффициентах электрической редукции равных 64 или 128, обеспечивают повторяемость электрических периодов ДУТО на уровне десятых долей секунды (высоко периодичные ДУТО). Обеспечивается аналого-цифровое преобразование выходных сигналов ДУТО в пределах электрического периода соответствующей точности.

Сложность решения задачи повышения точности преобразования в данном виде измерительных приборов заключается в том, что выходные сигналы высоко периодичных ДУТО могут отличаться в разной степени от желаемых синусно-косинусных зависимостей по углу при переходе от образца к образцу, даже в пределах одной партии (технологический разброс характеристик).

Как известно, амплитудное преобразование следящего типа соответствует тригонометрическому выражению вида $\sin\alpha \cdot F_C(N) - \cos\alpha \cdot F_S(N) \rightarrow 0$ при $N = \text{var}$, где α - угловое положение ротора ДУ в пределах электрического периода, N - двоичный выходной код ЦПУ (в идеальном случае выполняется условие $\alpha = 2\pi N$), $F_C(N)$ - функция вида $\cos 2\pi N$ или ее аппроксиматор, а $F_S(N)$ - функция вида $\sin 2\pi N$ или ее аппроксиматор. В цепи обратной связи построенного таким образом амплитудного ЦПУ следящего типа последовательно включены аналоговый и цифровой интегратор, что обеспечивает получение астатизма второго порядка [2]. При этом цифровой интегратор образован преобразователем напряжения рассогласования (между углом и кодом) в частоту следования импульсов (ПНЧ) и двоичным реверсивным счетчиком указанных импульсов. При синусно-косинусных зависимостях ДУ и электронной преобразующей части ЦПУ выходное напряжение $U_{\text{АИ}}$ аналогового интегратора (входное напряжение ПНЧ) отображает в виде напряжения постоянного тока текущее значение скорости вращения ротора (вала) ДУ и поэтому его можно рассматривать как относительно точный тахометрический сигнал.

Развитием амплитудного преобразования классического вида, обеспечивающим повышение конечной точности преобразования, является введение в состав ЦПУ блока

коррекции начальной погрешности преобразования ($N_{НАЧ}$). В одном варианте исполнения корректируемого ЦПУ блок коррекции тем или иным способом предварительно формирует массив кодов коррекции $N_{КОРР}(N_{НАЧ})$ и передает его на энергонезависимое устройство хранения с опорой на начальные значения выходного кода ЦПУ ($N_{НАЧ}$). Далее в штатном режиме преобразования формируется конечное (скорректированное) значение выходного кода ($N_{КОН}$) путем суммирования соответствующих значений $N_{НАЧ}$ и $\Delta N_{КОРР}(N_{НАЧ})$. При другом варианте исполнения корректируемого ЦПУ блок коррекции вырабатывает определенные напряжения, введение которых в цепь сигнала рассогласования обеспечивает снижение конечной погрешности преобразования.

В работе [3] предложен "Способ преобразования угла в код", который, по мнению его авторов, также с помощью блока коррекции, обеспечивает повышенную точность преобразования при использовании квазисинусоидальных ДУТО. Для этого в основном канале и в блоке коррекции используются соответствующие датчики из состава сдвоенного ДУТО, различающиеся коэффициентами электрической редукции. При реализации указанного способа преобразования предварительно формируются массивы парных выходных кодов N_1 и N_2 основного канала и блока коррекции. Они определяются в ограниченном числе задаваемых (равно отдаленных) контрольных (базовых) угловых положениях ротора сдвоенного ДУТО. Специальная алгоритмическая обработка спаренных кодов формирует массив кодов коррекции $N_{КОРР}(N_{НАЧ})$, использование которого совместно с кодами основного канала ($N_{НАЧ}$) должно обеспечивать повышение конечной точности преобразования. Очевидно, что при таком построении аппаратные средства ЦПУ увеличиваются в два раза и качество квазитахометрического сигнала (при использовании следящего принципа преобразования угла в код) определяется начальной точностью преобразования, а не повышенной конечной.

Достижению предельно точного конечного преобразования угла в код такого вида препятствуют: погрешность задания базовых угловых положений, принадлежащих полному обороту ротора, несмотря на их уменьшенное количество; возможный взаимный производственный разброс выходных зависимостей по углу сдвоенного ДУТО в пределах собственных электрических периодов и использование алгоритма формирования кодов коррекции без учета величин второго порядка малости.

Особенность предлагаемых корректируемых ЦПУ заключается в том, что при формировании массива кодов коррекции $N_{КОРР}(N_{НАЧ})$ не используют традиционное метрологическое оборудование и не требуется применение сдвоенного ДУТО со всеми вытекающими отсюда положительными последствиями. Первая из рассматриваемых

далее структур для повышения конечной точности преобразования требует выполнения начальных регулировочных операций в ручном режиме, а две последующие - обеспечивают коррекцию начальной погрешности ЦПУ в автоматическом режиме.

В работе [4] предложена структура построения ЦПУ, в которой с помощью первого и второго регулируемых функциональных цифроаналоговых преобразователей (ФЦАП1 и ФЦАП2) блока коррекции нейтрализуется негативное воздействие на конечную точность преобразования третьей, пятой, седьмой и девятой пространственных гармоник ДУТО, т.е. гармоник со значимыми амплитудными значениями, свойственных реальным квазисинусоидальным ДУТО. Объединенные входы опорного напряжения ФЦАП1 и ФЦАП2 подключены к выходу формирователя опорного напряжения $U_{оп}$. Значение опорного напряжения не должно зависеть от углового положения ротора ДУТО, а его временная фазовая характеристика должна соответствовать фазовой характеристике выходных напряжений ДУТО. По цифровым входам ФЦАП1 и ФЦАП2 управляются выходным кодом ЦПУ ($N_{вых}$) таким образом, что формируются два корректирующих напряжения вида $U_{корр1} = A_1 * U_{оп} * \sin(8\pi N_{вых})$ и $U_{корр2} = A_2 * U_{оп} * \sin(16\pi N_{вых})$, где A_1 и A_2 - регулируемые значения соответствующих выходных напряжений блока коррекции. Указанные корректирующие напряжения в виде дополнительных составляющих вводятся в цепь сигнала рассогласования амплитудного ЦПУ следящего типа.

Установка необходимых значений A_1 и A_2 корректирующих напряжений $U_{корр1}$ и $U_{корр2}$ осуществляется простейшим приемом. Оператор устанавливает последовательно во времени ротор ДУТО в базовые угловые положения $\alpha_1 = 0,25\pi$ и $\alpha_2 = 0,125\pi$. Затем регулирует значения корректирующих напряжений таким образом, чтобы обеспечить нулевую погрешность преобразования в базовых угловых положениях α_1 и α_2 . Доказано, что выполнение указанных операций обеспечивает точное преобразование угла в код в пределах всего электрического периода ДУТО. При квазисинусоидальности ДУТО другого вида для точного преобразования необходимо соответствующим образом развивать и настраивать блок коррекции по большему числу базовых угловых положений. В данной структуре выполнение условия точного формирования конечного значения выходного кода автоматически сопровождается выполнением условия формирования точного квазитахометрического сигнала.

Отметим, что несмотря на малое число используемых базовых угловых положений, достижимая точность конечного преобразования продолжает ограничиваться возможностями используемых угломерных устройств. В патенте [5] приведены основные положения по формированию информационного сигнала о текущей погрешности преобразования. Этот сигнал характеризует текущую погрешность преобразования по

углу в виде соответствующего изменяющегося по времени напряжения постоянного тока (дальнейшее развитие многофункциональности). Очевидно, что использование такого контрольного экспресс - сигнала, который может быть представлен соответствующим лучом регистрирующего осциллографа, обеспечивает возможность проведения необходимых регулировочных операций по корректировке ЦПУ без использования угломерных устройств, т.е. выполняется переход от фиксации угловых значений погрешности к фиксации ординат напряжений, соответствующих определенным временным отметкам (развертка луча на экране регистрирующего осциллографа). Регулировкой значений A_1 и A_2 обеспечиваются нулевые значения контрольного экспресс - сигнала в моменты времени, соответствующие прохождению ротором ДУ угловых положений $\alpha_1 = 0,25\pi$ и $\alpha_2 = 0,125\pi$. Повторное выполнение регулировочных операций позволяет повысить точность их выполнения, так как каждый раз оно будет проводиться в условиях пониженных значений контрольного экспресс - сигнала, т.е. с повышенной чувствительностью регистрирующего осциллографа.

Очевидно, что привлекательность такого способа регулировки корректируемого ЦПУ заключается: в повышении точности конечного преобразования, в многократном сокращении материальных и временных затрат при проведении регулировочных и контрольных испытаний, в возможности проведения контрольных испытаний как при производстве ЦПУ, так и при эксплуатации в составе ЦСУ при всех видах внешнего воздействия, включая воздействие спецфакторов. Например, время выполнения указанных регулировочных операций макетного образца 20-разрядного ЦПУ не превысило 15 минут и обеспечило десятикратное повышение точности преобразования при начальной погрешности более 10". В указанный временной интервал вошло и время установки ДУ в приспособление.

Рассмотренный корректируемый ЦПУ обладает расширенной многофункциональностью, так как в нем при точном конечном преобразовании без дополнительной аппаратуры формируются точный квазисинусоидальный сигнал и контрольный экспресс – сигнал, с высокой степенью достоверности характеризующий текущую погрешность преобразования.

Следующая структура построения корректируемого ЦПУ (ЦПУ с внешней цифровой коррекцией) характеризуется тем, что формирователь массива кодов коррекции ($\Delta N_{\text{КОРР}}(N_{\text{НАЧ}})$) является составной частью ЦПУ, а корректировка конечной погрешности преобразования осуществляется в автоматическом режиме.

В заключение рассмотрим синтезированную структуру ЦПУ с внутренней цифроаналоговой коррекцией начальной погрешности преобразования. В таком ЦПУ

также используется предварительно сформированный массив кодов коррекции $N_{\text{КОРР}}(N_{\text{НАЧ}})$. Отличительной чертой рассматриваемого ЦПУ является то, что для повышения конечной точности преобразования указанный массив преобразуется в соответствующее напряжение переменного тока, которое используется в виде дополнительной составляющей сигнала рассогласования основного канала преобразования. Требуемое преобразование кода в напряжение переменного тока осуществляется с помощью дополнительного цифроаналогового преобразователя (ЦАП). При этом опорное напряжение ЦАП формируется таким образом, чтобы его амплитудные значения не зависели от углового положения ротора ДУ, а фазовая характеристика выходного сигнала ЦАП точно соответствовала фазовой характеристике выходных сигналов ДУ. В ЦПУ с внутренней коррекцией одновременно с повышением точности конечного преобразования угла в код автоматически повышается качество квазитахометрического сигнала.

Преобразователь с внутренней коррекцией в полной мере реализует понятие многофункциональности, так как он практически без использования дополнительного оборудования формирует точный квазитахометрический сигнал и контрольный сигнал, точно характеризующий текущую погрешность преобразования.

Справедливость основных теоретических положений данной статьи подтверждена математическим моделированием, а также результатами испытаний макетных и штатных образцов корректируемых одноотсчетных и двухотсчетных ЦПУ.

Полученные результаты исследований подтвердили возможность создания корректируемых ЦПУ с точностью преобразования до долей угловой минуты в одноотсчетном варианте исполнения и единиц (долей) секунд в двухотсчетном варианте исполнения. При этом успехи радиоэлектроники позволяют обеспечить разрешающую способность до 18 двоичных разрядов в одноотсчетном варианте исполнения и до 25 двоичных разрядов в двухотсчетном варианте.

Следует также отметить универсальность предлагаемых научно-технических решений по коррекции начальной погрешности преобразования 2-отсчетных ЦПУ. Их использование для построения одноотсчетных ЦПУ с ДУ типа 2-полюсных ВТ обеспечивает повышенную точность преобразования угла в код по отношению к точностным характеристикам входящего ВТ, что позволяет в некоторых случаях заменять ими более дорогие и более габаритные 2-отсчетные ЦПУ.

Список литературы

1. Следящие приводы. В 3 т. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Т. 2. Е.С. Блейз и др. Электрические следящие приводы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. С. 58.
2. Сеймур Лэнтон. // Гибридный преобразователь сельсин-код с большими интегральными схемами. Электроника, № 13, 1981. С. 43-48.
3. Аксененко В.Д., Аксененко Д.В. // Способ преобразования угла поворота вала в код. Патент РФ № 2235422. Опубликовано: 27.08.2004 Бюл. № 24.
4. Домрачев В. М., Сигачев И. П. Цифровой преобразователь угла. Патент РФ № 2365057. Опубликовано: 20.08.2009 Бюл. № 23.