

А. А. Бошляков, В. М. Домрачев,  
Е. В. Ипполитова

## **ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АМПЛИТУДНЫХ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СЛЕДЯЩЕГО ТИПА**

*Разработана математическая модель, позволяющая промоделировать работу цифрового преобразователя угла (ЦПУ) с произвольной структурой и параметрами (что снижает временные и материальные затраты на разработку), выполнить сравнительный анализ различных структур построения и выбрать оптимальный вариант ЦПУ с учетом точностных характеристик и аппаратной реализации.*

**E-mail: robot@sm.bmstu.ru**

**Ключевые слова:** цифровой преобразователь угла, математическая модель, погрешность преобразования.

Амплитудный цифровой преобразователь угла (ЦПУ) следящего типа — важный элемент современных цифровых систем управления угловыми положениями подвижных частей объекта регулирования.

Функционирование амплитудного ЦПУ следящего типа описано, например, в работе [1]. Преобразование угла в цифровой код реализуется методом обратной связи, при котором сигнал с цифрового выхода подается на функциональные генераторы. Вырабатываемые генераторами сигналы используются для изменения цифрового сигнала таким образом, чтобы его значение стало точно соответствовать положению вала. Равновесное состояние достигается всякий раз, когда выходной сигнал соответствует положению вала.

Построенные по указанному принципу системы отличаются типом используемого функционального генератора, способами формирования сигнала рассогласования и образования выходного кода.

Применяется несколько разновидностей функциональных генераторов. Это может быть многоотводный трансформатор, трансформаторно-резистивная схема, линейная резистивная схема и др. Рассмотрим подробнее некоторые схемы.

Характерной чертой зарубежных ЦПУ, например фирмы Analog Devices или Data Device Corporation, является построение преобразователей с помощью малогабаритных многоотводных автотрансформаторов с кусочно-линейной аппроксимацией (аппроксимация вписанным многоугольником) [1]. Они обеспечивают в одноотсчетном варианте исполнения погрешность преобразования на уровне единиц угловых минут и разрешающую способность до 16 разрядов включительно. При этом следует учитывать, что при преобразовании сигналов квазисинусоидальных датчиков угла погрешность преобразования

в точках переключения отводов трансформаторов может изменяться скачкообразно со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями.

Под квазисинусоидальностью понимается наличие постоянных составляющих в огибающих выходных напряжений, нарушение ортогональности этих огибающих, неравенство их амплитудных значений и присутствие в них высших (пространственных) гармоник. При этом погрешность преобразования от степени квазисинусоидальности может изменяться в допустимых пределах у разных образцов, изготовленных даже на одном производстве (производственный разброс).

Известны отечественные структуры построения ЦПУ, реализуемые при использовании синусно-косинусных постоянных запоминающих устройств (ПЗУ). Например, таким образом построен 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь сигналов вращающегося трансформатора (АЦПВТ) отечественной гибридной микросборки серии 2602 производства НИИ ЭМП (г. Пенза). Такая реализация теоретически обеспечивает идеальное по точности преобразование угла в код при использовании в качестве датчика угла синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ). При отличии выходных зависимостей датчика угла от синусно-косинусных функций (проявление квазисинусоидальности) возникающая погрешность преобразования имеет монотонный характер изменения по углу, что облегчает ее коррекцию.

Повысить точность преобразования ЦПУ с квазисинусоидальными датчиками угла удастся путем компенсации погрешности преобразования, например, следующими способами:

- использование в ЦПУ вычислителя корректирующего сигнала по методу формирования и обработки квадратов выходных сигналов датчиков угла [2];
- коррекция по методу сравнительной обработки сигналов двоянных датчиков угла [3];
- использование в ЦПУ аналого-цифровой коррекции начальной погрешности преобразования [4].

Многообразие вариантов построения ЦПУ привело к необходимости систематизации известных структур.

В работе [5] систематизированы сведения о принципах действия и особенностях преобразователей перемещений, рассмотрены методы и схемы построения преобразователей перемещений, скорости и ускорения.

Классификация ЦПУ представлена также в работе [6], в которой предложено описание модели ЦПУ, объединяющей несколько сотен вариантов структур построения преобразователей.

Для реализации корректируемых ЦПУ в их состав должны входить следующие основные устройства: двухфазный ДУ типа СКВТ, работающий в режиме пульсирующего поля; аналого-цифровой преобразователь выходных сигналов датчика угла в выходной код, использующий различные виды цифроаналогового преобразования; формирователь корректирующих напряжений и формирователь входных (базовых) сигналов того или иного вида для корректирующих напряжений.

Такому построению и соответствует представляемая математическая модель, обобщенность которой определяется возможностью выбора структуры построения каждого из указанных устройств ЦПУ. Разновидность входящих устройств и их число обеспечивают возможность математического моделирования сотен вариантов исполнения ЦПУ различного класса точности.

Предлагаемая модель представлена на рис. 1.

К основным устройствам относятся: датчик угла (DU), первый и второй идентичные преобразователи (Convertor 1 и Convertor 2), первое и второе идентичные интегрирующие звенья (Tint 1 и Tint 2), преобразователи базовых сигналов (Convertor UB1... UB5, Convertor UB6/UB7, Convertor UB8), формирователи гармонического (Form sin12b1) и корректирующих (Form Uk1, Form Uk2) сигналов, формирователи сигналов управления (Form 1) и погрешностей (Form 2), блоки задания постоянных значений и вспомогательные электронные осциллографы.

В датчике угла (DU) оператором задаются те или иные значения кода N1 (upr. DU), которые определяют степень отличия выходных зависимостей ( $U_{f1}$  и  $U_{f2}$ ) от идеализированных синусно-косинусных функций.

Регулируемые параметры датчика угла:

- нарушение ортогональности фазных напряжений на заданное значение;
- изменение амплитудного значения напряжения второй фазы на заданное;
- включение 5-й пространственной гармоники;
- включение 9-й пространственной гармоники;
- включение 13-й пространственной гармоники;
- включение 17-й пространственной гармоники.

Возможные виды функционального цифроаналогового преобразования  $F_1(x) \dots F_5(x)$  содержатся в первом и втором преобразователях (Convertor 1 и Convertor 2) выходных сигналов датчика угла в выходные коды (b1 и b2). Выбор конкретного вида осуществляется путем задания определенного значения второго кода N2.

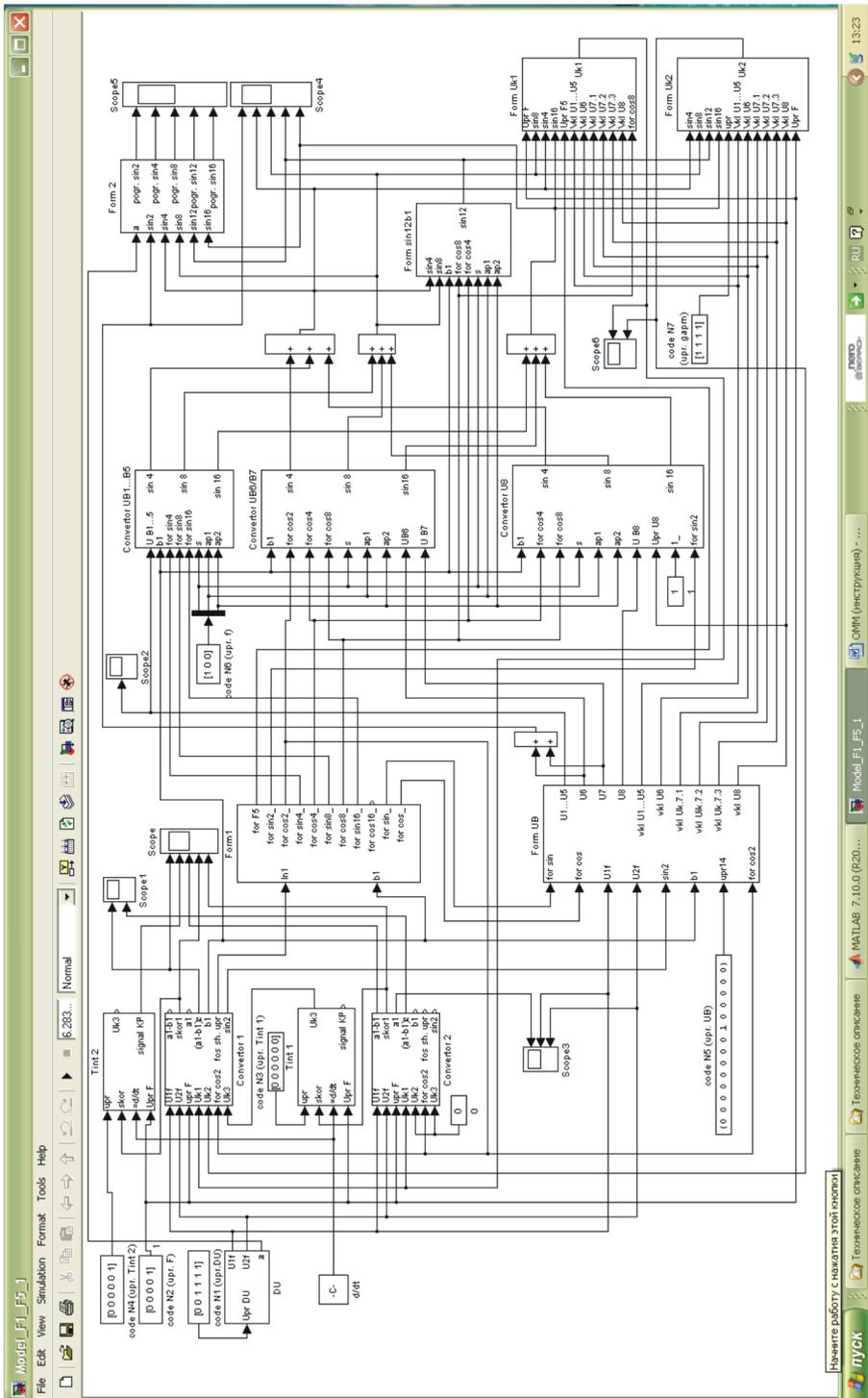


Рис. 1. Математическая модель амплитудных цифровых преобразователей следующего типа

Выбираемый вид функционального преобразования:

$$F_1(x) = \sin 0,5\pi x;$$

$$F_2(x) = x/(1 + 0,5551x);$$

$$F_3(x) = x/(1 + 0,6052x);$$

$$F_4(x) = x/(1 + 0,7480x - 0,1773x^2);$$

$$F_5(x) = x/(1 + 0,5522x).$$

Первое и второе интегрирующие звенья (Tint 1 и Tint 2) под воздействием значений кодов управления N3 (upr. Tint 1) и N4 (upr. Tint 2) изменяют значения постоянной времени от 1 до 100 с (с определенными интервалами).

Формирователь (Form UB) образует четырнадцать базовых сигналов UB1...UB8 и при этом передает на свой выход один из них для последующего формирования корректирующих сигналов в зависимости от значения кода N5 (upr. UB).

Преобразователи (Convertor UB1...UB5, Convertor UB6/UB7, Convertor UB8) базовых сигналов в гармонические составляющие ( $\sin 4b1$ ,  $\sin 8b1$  и  $\sin 16b1$ ) корректирующих напряжений (Uk1, Uk2, Uk3) используют тот или иной вид функционального преобразования:  $f_1 = \sin 0,5\pi u$ ,  $f_2 = 2,26u/(1 + 1,26\text{abs}(u))$  и  $f_3 = 1,455u/(1 - 0,383\text{abs}(u) + 0,838(u^2))$ . Выбор вида преобразования осуществляется заданием определенных значений кода N6 (upr. f). При этом выполняется условие  $u \equiv x$ .

Формирователь Form  $\sin 12b1$  образует еще одну гармоническую составляющую вида  $\sin 12b1$ , а формирователь Form Uk1 образует из названных гармонических составляющих, путем масштабирования их амплитудных значений первый корректирующий сигнал (Uk1). Масштабные коэффициенты гармонических сигналов выбираются под воздействием текущего значения как code N2 (upr. F). Реализация такого алгоритма позволяет, по возможности, минимизировать в каждом конкретном случае методическую погрешность преобразования углового положения вала в код.

Формирователь второго корректирующего сигнала Form Uk2 также минимизирует погрешность преобразования, но уже в случае использования квазисинусоидального ДУ. При этом необходимый набор гармонических составляющих корректирующего сигнала определяется значениями кода "code N7 (upr. garm)".

Вводимые гармонические составляющие корректирующего сигнала вида Uk2:  $\sin 4b1$ ,  $\sin 8b1$ ,  $\sin 12b1$ ,  $\sin 16b1$ .

Назначение формирователя Form. 1 — вырабатывать цифровые сигналы управления блоками Convertor 1, Convertor 2, Form UB, Convertor UB1...UB5, Convertor UB6/UB7, Convertor UB8, Form Uk1 и Form Uk2,

а задача формирователя Form.2 — вычислять отличие выходных гармонических сигналов ( $\sin 4b_1$ ,  $\sin 8b_1$ ,  $\sin 12b_1$ ,  $\sin 16b_1$ ) блоков Converter 1, Converter UB1...UB5, Converter UB6/UB7, Converter UB8 и формирователя Form  $\sin 12b_1$  от соответствующих точных тригонометрических функций.

Для получения требуемой крутизны изменения входной угловой координаты “а” используется масштабный усилитель “к”, коэффициент передачи которого и определяет требуемое значение.

Представленные на рисунке связи между перечисленными функциональными устройствами обеспечивают реализацию требуемого алгоритма преобразования входной координаты “а” в выходную координату “b1” при заданной крутизне изменения “а” и за заданное время преобразования.

Модель функционирует в соответствии с выбранными значениями ранее указанных кодов управления. Взаимная независимость сочетаний значений этих кодов обеспечивают возможность формирования нескольких сотен алгоритмов преобразования (вариантов исполнения ЦПУ) и последующего анализа показателей точности преобразования.

На рисунке также приведен ряд электронных осциллографов, фиксирующих изменение сигналов после завершения цикла преобразования в характерных точках модели.

Сигнал на первом луче осциллографа Score характеризует погрешность преобразования в виде разностного значения входной координаты  $a_1$  и выходной координаты  $b_1$ . Сигнал на втором луче этого же осциллографа показывает изменение сигнала “Контроль погрешности”, который в рассматриваемых ЦПУ при коде N, равном 0 0 0 0 1, должен полностью совпадать с сигналом откорректированной погрешности ( $a_1 - b_1$ ). Сигнал на третьем луче характеризует начальную (неоткорректированную) погрешность преобразования, т.е. погрешность преобразования без использования корректирующих напряжений. Сигналы на четвертом и пятом лучах характеризуют выходные тахометрические сигналы в откорректированном и не откорректированном вариантах исполнения ЦПУ соответственно.

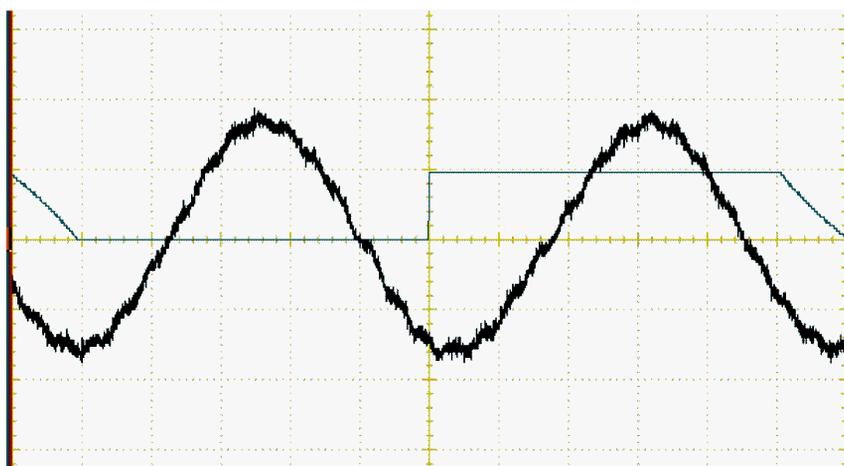
Сигналы на первом и втором лучах осциллографа Score 1 дублируют (в другом масштабе) сигналы погрешности преобразования откорректированного и неоткорректированных преобразователей. Осциллограф Score 2 показывает базовый сигнал группы UB1...UB5, присутствующий во время преобразования на соответствующем выходе формирователя базовых сигналов (Form UB). Сигнал на первом луче осциллографа Score 3 соответствует изменению входной координаты  $a_1$ , а на втором и третьем — выходным значениям датчика угла (U1f и U2f). На пяти лучах осциллографа Score 4 представляются формируемые моделью гармонические составляющие вида  $\approx \sin 2b_1$ ,  $\approx \sin 4b_1$ ,

$\approx \sin 8b1$ ,  $\approx \sin 12b1$  и  $\approx \sin 16b1$  соответственно, а на пяти лучах осциллографа Scope 5 – погрешность их формирования. И наконец, на двух лучах осциллографа Scope 6 представляются формируемые корректирующие напряжения  $U_{k1}$  и  $U_{k2}$ .

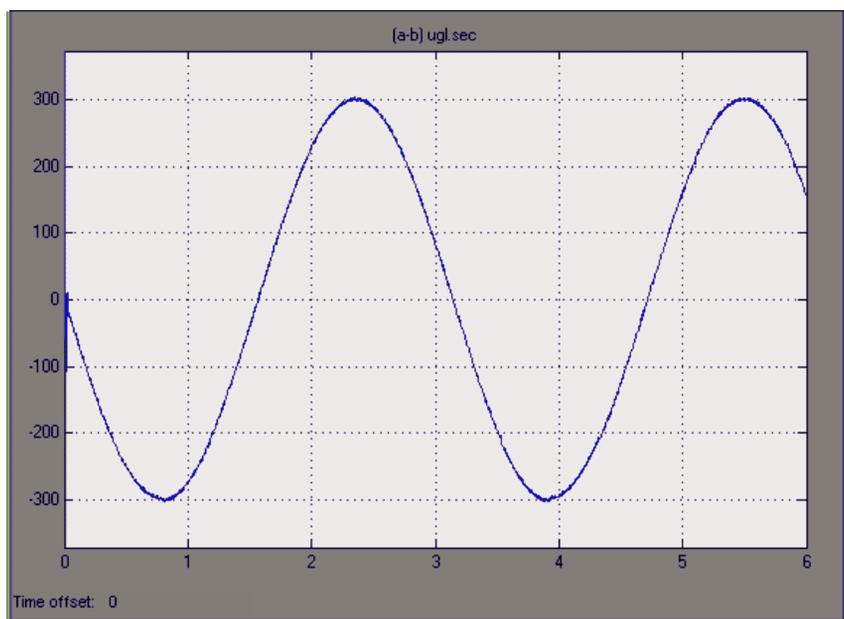
На рис. 2 представлены графики погрешности преобразования, полученные в результате моделирования ЦПУ.

Разработанная математическая модель позволяет:

- промоделировать ЦПУ с любой структурой и параметрами, что снижает временные и материальные затраты на разработку ЦПУ;



*a*



*б*

**Рис. 2. Графики погрешности преобразования, полученные в результате испытания реального ЦПУ (а) и моделирования ЦПУ (б)**

- выполнить сравнительный анализ различных структур построения ЦПУ и выбрать оптимальный вариант с учетом точностных характеристик и аппаратной реализации.

Модель имеет открытую архитектуру.

Построение модели позволяет также исследовать динамические характеристики ЦПУ как следящей системы автоматического регулирования с астатизмом второго порядка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В у л ь в е т Д ж. Датчики в цифровых системах / Пер. с англ. Под ред. А.С. Яроменка. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
2. В ы с о к о т о ч н ы е преобразователи угловых перемещений / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахметжанов, М.А. Габидулин и др.; Под общ. ред. А.А. Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
3. С а ф о н о в Л. Н. Измерители перемещений на основе двух разнополюсных датчиков. – М.: Сов. радио, 1995.
4. Ц и ф р о в ы е преобразователи угла с коррекцией начальной погрешности преобразования / Н.Н. Воронин, В.М. Домрачев, И.П. Сигачев и др. // Измерительная техника. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – № 1. – С. 23–28.
5. С х е м о т е х н и к а цифровых преобразователей перемещений: Справочное пособие / В.Г. Домрачев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
6. S h m i d Н. An electronic design: practical guide for synchro-to-digital converters // Electronic Design. 1970.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012