

УДК 62-503.54

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФУНКЦИЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОДА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ В СОВОКУПНОСТИ С ИНДУКЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ УГЛА

Болгов И.С., Дементьев Ю.Н.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, e-mail: bolgov_is@mail.ru, dementev@tpu.ru*

Настоящая статья посвящена разработке прецизионного формирователя кода положения и скорости вращения ротора при условии использования в качестве датчика положения синусно-косинусного вращающегося трансформатора. В статье рассмотрены основные методы построения преобразователей для расчета кодов скорости вращения и положения вала двигателя получаемых путем преобразования гармонических сигналов с аналогового индукционного датчика положения. Предложены схемы преобразователей, построенные по различным методам, рассмотрены их принципы работы, преимущества и недостатки. Проведена адаптация метода CORDIC для расчета угла аналогового гармонического сигнала, спроектирована функциональная схема преобразователя с двухотсчетным индукционным датчиком. По результатам анализа выбран оптимальный метод, который позволяет построить адаптивный преобразователь угол-код с малыми статической и динамической погрешностями, высокими быстродействием и надежностью.

Ключевые слова: цифровой электропривод, прецизионный преобразователь угол-код, тангенциальное преобразование, метод CORDIC

PRECISION ANGLE-CODE CONVERTER WITH SPEED CODE FORMING FUNCTION IN COMBINATION WITH INDUCTION ANGLE SENSOR

Bolgov I.S., Dementev Yu.N.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: bolgov_is@mail.ru, dementev@tpu.ru

This article is dedicated to design of precision former of position and shaft angular velocity codes in case of using of a sine-cosine rotating transformer as a position sensor. The article describes the main methods for creating the converter intended to calculate the position and motor's shaft angular velocity codes obtained by converting the harmonic signals from an analogue position inductive sensor. The schemes of converters constructed by various methods are offered, their operation principles, advantages and disadvantages are considered. The adaptation of CORDIC method for calculating the analog harmonic angle is carried out; the functional converter circuit with double reference system inductive sensor is developed. According to the analysis results the optimal method which allows to build an adaptive angle-code converter with low static and dynamic errors, high speed and reliability is selected.

Keywords: digital electric drive, precision angle-code converter, tangential conversion, CORDIC method

В настоящее время для создания высокоточного электропривода все чаще применяются цифровые системы управления, в которых используются цифровые датчики [5]. Но в некоторых условиях невозможно использовать цифровые датчики скорости и положения ротора (космос, агрессивные среды, среды с высокой степенью излучения). В таких электроприводах используются аналоговые датчики по типу синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ). Кроме того, при модернизации электроприводов, если в него интегрируется цифровая система управления, необходимо согласование с ней аналоговых датчиков.

Современные системы определения угла положения и скорости вращения ротора по гармоническим сигналам СКВТ отличаются узким диапазоном работы, большой погрешностью, низкой адаптивностью к другим электроприводам, а также слабой защитой от шумов при низком уровне сигнала. К тому же очень мало преобразовате-

лей угол-код формируют код скорости вращения вала, что тоже является очень важной координатой при управлении двигателем. В связи с вышеуказанными проблемами целью работы было создание высокоточного преобразователя угол-код, обладающего высокой адаптивностью при интеграции её в электроприводах, большим диапазоном работы и высокой стабильностью выходных характеристик.

В настоящее время наиболее известны два типа преобразователей угол-код [4]:

- фазовые цифровые преобразователи угла (ФЦПУ);
- амплитудные цифровые преобразователи угла (АЦПУ).

Эти преобразователи имеют множество вариантов и модификаций. СКВТ в каждом канале отсчета находятся две взаимно ортогональные обмотки и одна синфазная. Если на ортогональные обмотки одного из каналов отсчета подать прецизионное квадратурное напряжение, то датчик будет

работать в фазовом режиме ФЦПУ и при этом можно использовать только один канал отсчета во избежание взаимовлияния каналов. Для построения двухотсчетной системы на базе ФЦПУ требуются два датчика, однако это приводит к ухудшению массогабаритных характеристик. Кроме того, фазовые системы отсчета уступают амплитудным по разрешающей способности выходного сигнала. Исходя из этого, целесообразно использовать амплитудный способ преобразования сигнала угла в цифровой код, для этого существуют два известных типа АЦПУ:

- преобразователи, основанные на тангенциальном преобразовании;
- следящие фазовые преобразователи сигналов (ФПС).

Функциональная схема тангенциального АЦПУ показана на рис. 1.

Принцип работы системы основан на тригонометрических преобразованиях [2] гармонических сигналов, поступающих с СКВТ. Перед подачей сигналов с СКВТ на микроконтроллер их необходимо оцифровать. Так как АЦП микроконтроллера не поддерживает входной сигнал отрицательной полярности, то перед подачей на микроконтроллер аналоговые гармонические сигналы с помощью блоков смещения БС1, БС2,

БС5, БС6 необходимо сместить относительно нуля, чтобы сигнал имел только положительную полярность. После оцифровки эти сигналы с помощью блоков смещения БС3, БС4, БС7, БС8 смещаются обратно симметрично относительно нуля. Затем в микроконтроллере происходит деление сигналов синусов и косинусов и вычисление арктангенсов этих величин, т.е. значение углов аналоговых сигналов. В блоках вычисления БВ1 и БВ2 определяется, в каком квадранте находятся вычисленные значения углов согласно следующим условиям:

если $\sin(\varphi) > 0$ & $\cos(\varphi) > 0$,

тогда $\varphi = \arctg(\varphi)$;

если $\cos(\varphi) < 0$,

тогда $\varphi = \arctg(\varphi) + \pi$;

если $\sin(\varphi) < 0$ & $\cos(\varphi) > 0$,

тогда $\varphi = \arctg(\varphi) + 2\pi$.

В результате на выходе блоков вычисления БВ1 и БВ2 сформированы пилообразные характеристики. Эти характеристики соответствуют изменению углов аналоговых сигналов каналов точного и грубого

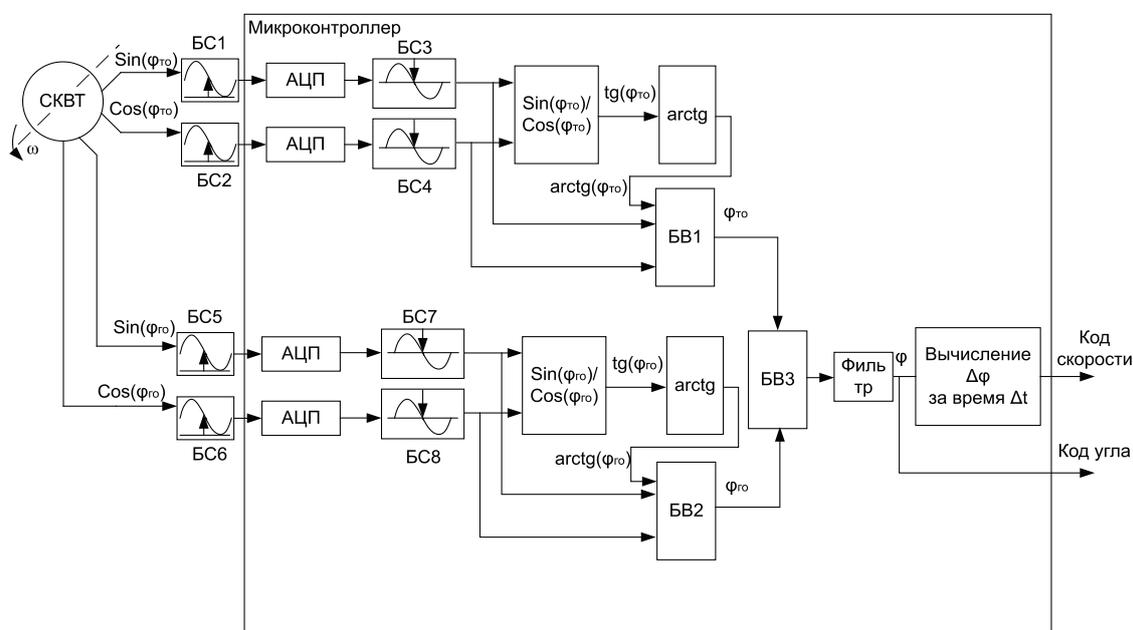


Рис. 1. Функциональная схема тангенциального АЦПУ:

- БС1, БС2, БС5, БС6 – блоки смещения аналогового сигнала относительно 0;
- АЦП – аналогово-цифровые преобразователи, встроенные в микроконтроллер;
- БС3, БС4, БС7, БС8 – блоки (программы) смещения аналогового сигнала симметрично 0;
- arctg – блок (программа) вычисления арктангенса; БВ1 и БВ2 – блоки (программы) вычисления углов каналов точного отсчета (ТО) и грубого отсчета (ГО);
- БВ3 – блок (программа) вычисления угла положения вала

отсчетов СКВТ. Вычисление положения вала происходит в блоке вычисления БВЗ согласно условию [3]:

$$\text{если } \varphi_{\text{ГО}} - \left(\frac{\varphi_{\text{ГО}}}{N_{\text{эл.ред}}} + \frac{360^\circ}{N_{\text{эл.ред}}} \cdot n \right) \approx 0,$$

$$\text{тогда } \varphi = \frac{\varphi_{\text{ГО}}}{N_{\text{эл.ред}}} + \frac{360^\circ}{N_{\text{эл.ред}}} \cdot n, \quad (1)$$

где $N_{\text{эл.ред}}$ – коэффициент электрической редукции СКВТ; $n = 1 \dots N_{\text{эл.ред}}$, изменяется последовательным перебором чисел.

Вычисление кода скорости происходит по формуле

$$\omega = \Delta\varphi/\Delta t. \quad (2)$$

Точность преобразования и стабильность выходного кода зависят от разрядности АЦП и емкости выходного фильтра, а также от количества задействованных разрядов для вычисления арктангенса. Таким образом, с уменьшением погрешности преобразователя будет уменьшаться быстродействие и, как следствие, будет увеличиваться динамическая ошибка.

В качестве второго варианта для построения преобразователя угол-код можно использовать следящий преобразователь тангенсного типа, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

В результате преобразования сигналов напряжение на выходе ФЧВ, приведенное к первому октанту, можно определить по следующему выражению:

$$U_\phi = U \frac{\sin(\beta - N_\beta)}{\cos N_\beta}. \quad (3)$$

Это напряжение является сигналом ошибки замкнутого контура через ФПК. С помощью интегратора Инт. это напряжение в установившемся режиме равно нулю, вследствие чего возникает равенство

между выходным кодом преобразователя N_β и углом положения β , выраженным в двоичном коде. Максимальное значение статической погрешности данного АЦПУ можно определить по формуле

$$\Delta N_m = \frac{0,707 \Delta U}{N_{\text{эл.ред}}}, \quad (4)$$

где ΔU – погрешность УЦАП; $N_{\text{эл.ред}}$ – коэффициент электрической редукции СКВТ.

К сожалению, существенным недостатком этой системы является сложная реализация на микроконтроллере из-за последовательности производимых расчетов и в результате наличия временного сдвига между входным и выходным значениями, а достоинством является отсутствие статической погрешности.

В последнее время широкое распространение получили методы расчета векторных и тригонометрических функций, основанные на CORDIC. CORDIC (от англ. Coordinate Rotation Digital Computer – цифровой вычислитель поворота системы координат) – вычислитель, основанный на итерационном методе сведения прямых вычислений сложных функций к выполнению простых операций сложения и сдвига [1].

Такой подход особенно полезен при вычислении тригонометрических функций на микроконтроллерах или программируемых логических схемах. Поскольку шаги однотипны, то при аппаратной реализации алгоритм поддается развёртыванию в конвейер либо свертыванию в цикл.

Функциональная схема преобразователя, основанного на методе CORDIC, приведена на рис. 3.

Вычисление угла сводится к арифметическим операциям сложения и вычитания, для этого значение синуса в блоке вычисления VKsin преобразуется в эквивалентный

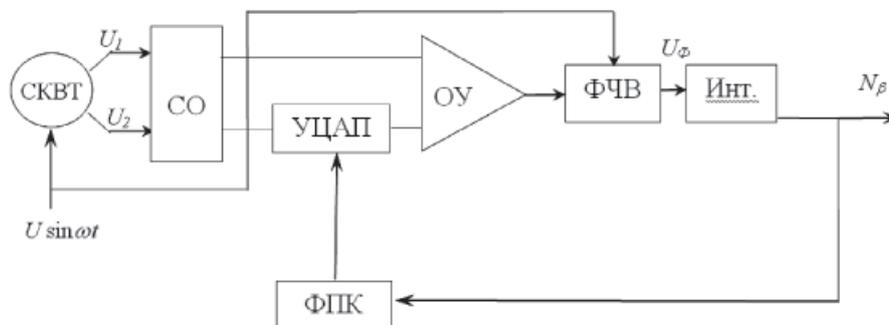


Рис. 2. Функциональная схема следящего тангенциального АЦПУ:

СО – селектор октантов; УЦАП – умножающий цифро-аналоговый преобразователь; ФПК – функциональный преобразователь кодов; ОУ – операционный суммирующий усилитель; ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель; Инт. – интегратор

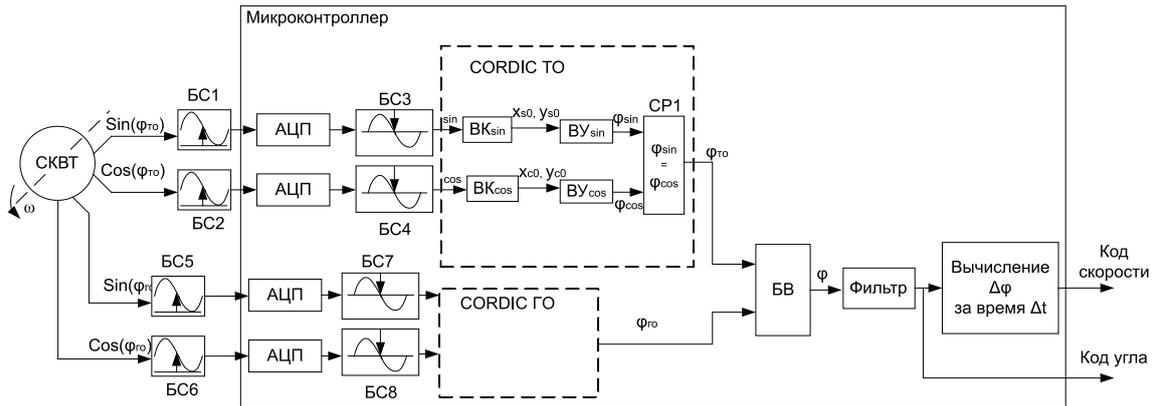


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя на методе CORDIC:

- BC1, BC2, BC5, BC6 – блоки смещения аналогового сигнала относительно 0;
 АЦП – аналогово-цифровые преобразователи, встроенные в микроконтроллер;
 BC3, BC4, BC7, BC8 – блоки (программы) смещения аналогового сигнала симметрично 0;
 BK_{sin} и BK_{cos} – блок (программа) вычисления начальных координат векторов;
 BY_{sin} и BY_{cos} – блоки (программы) вычисления углов синуса и косинуса по методу CORDIC;
 CP1 – блок (программа) сравнения рассчитанных значений углов синуса и косинуса;
 BB – блок (программа) вычисления истинного значения угла положения вала

вектор с координатами y_{s0} , x_{s0} . Далее в блоке вычисления BY_{sin} происходит вычисление угла согласно системе уравнений

$$\begin{cases}
 z_0 = 0; \\
 y_0 = \sin \varphi; \\
 x_0 = \sqrt{Am^2 - y_0^2}; \\
 \sigma_i = -\text{sign}(y_i); \\
 x_{i+1} = x_i - \sigma_i \cdot y_i \cdot 2^{-i}; \\
 y_{i+1} = y_i + \sigma_i \cdot x_i \cdot 2^{-i}; \\
 z_{i+1} = 180^\circ - z_i - \sigma_i \cdot 2^{-i}; \\
 z_{2i+1} = z_i + \sigma_i \cdot 2^{-i},
 \end{cases} \quad (5)$$

где Am – амплитудное значение гармонического сигнала.

Когда $y_i \approx 0$, значит

$$\varphi_{1 \sin} = z_{1i} = 180^\circ - \text{arctg} \left(\frac{y_0}{x_0} \right);$$

$$\varphi_{2 \sin} = z_{2i} = \text{arctg} \left(\frac{y_0}{x_0} \right).$$

Вычисление угла сводится к «стягиванию» эквивалентного вектора синусоиды к оси абсцисс, при этом одновременно происходит последовательное сложение переменной z , которая и является значением угла эквивалентного вектора. Таким образом, при $y = 0$ переменная z является углом синусоиды.

По аналогичным формулам рассчитывается угол для косинуса, так как в гармонических сигналах синуса и косинуса одному значению модуля вектора соответствуют два

значения угла, в блоке сравнения CP1 сравниваются величины рассчитанных углов для синуса и косинуса и совпавшее значение является истинным значением угла. Алгоритм расчета значения угла приведен на рис. 4.

В результате простых арифметических операций происходит «стягивание» вектора к оси x , тем самым одновременно вычисляется угол вектора, который равен углу гармонического сигнала. В блоке вычисления BB происходит вычисление угла положения ротора согласно формуле (1). Точность определения угла растет с увеличением разрядности значений переменной y , но в отличие от тангенциального АЦПУ увеличение разрядности переменных не влияет на быстродействие и динамическую ошибку преобразователя.

Таким образом, анализ известных схем преобразователей угол-код показал, что тангенциальные АЦПУ имеют малую статическую погрешность за счет уменьшения быстродействия и увеличения динамической погрешности, а следящие АЦПУ имеют низкие статическую и динамическую погрешности, но только при реализации на дискретных элементах с высокими быстродействием и точностью, что приводит к ухудшению массо-габаритных показателей, увеличению потребления и снижению надежности.

Заключение

1. За счет использования в алгоритме работы CORDIC простых алгебраических вычислений преобразователь на его основе имеет все преимущества тангенциального АЦПУ и лишен его недостатка в виде уменьшения быстродействия с увеличением точности.

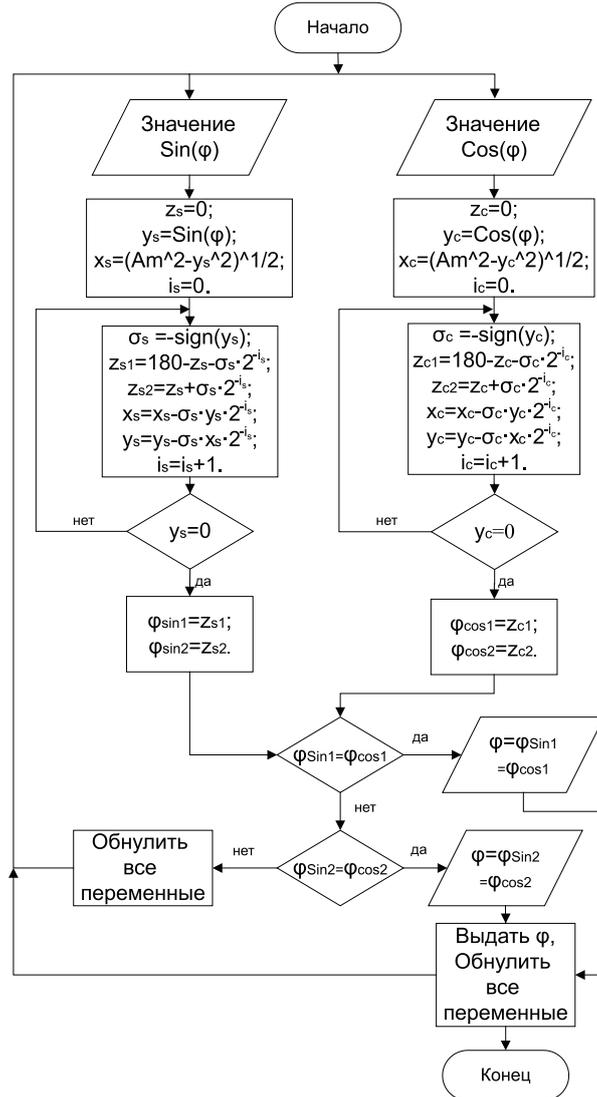


Рис. 4. Алгоритм CORDIC для расчета угла

2. Преобразователь на основе вычислений по методу CORDIC полностью адаптивен и может быть интегрирован в любой электропривод, имеющий в своем составе синусно-косинусный вращающийся трансформатор.

3. Особенностью является независимость входных сигналов от помех и искажений, потому что внутри микроконтроллера можно предусмотреть подпрограммы для защиты от нежелательных искажений и помех.

Список литературы

1. Байков В.Д., Смоллов В.Б. Специализированные процессоры: итерационные алгоритмы и структуры. – М.: Издво «Радио и связь», 1985. – 288 с.
2. Болгов И.С., Деметьев Ю.Н. High-precision former of velocity and motor shaft position angle codes // XII международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи «SIBCON-2016»: тезисы докл. (Москва, 12–14 мая 2016 г.). – URL: <http://ieeep.tpu.ru/hse/papers/462fu5u.pdf>.
3. Патент РФ № 0000142368, 27.06.2014 / Гавриш П.Е., Лянзбург В.П., Муравяткин Ю.Е. Двухканальный преобразователь угла поворота вала в код двухотчетного SKT

с произвольным числом электрической редукции // Патент России № 142368.2014. Бюл. № 18.

4. Петропавловский В.П., Синицын Н.В. Фазовые цифровые преобразователи угла. – М.: Машиностроение, 1984. – 136 с.
5. Шандров Б.В. Технические средства автоматизации: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

References

1. Bajkov V.D., Smolov V.B. Specialized processor: iteration algorithms and structures, Moskva, Izdatelstvo «Radio i svjaz», 1985. 288 p.
2. Bolgov I.S., Demetyev Y.N. High-precision former of velocity and motor shaft position angle codes // XII mezhduarodnaja IEEE Sibirskaja konferencija po upravleniju i svjazi «SIBCON-2016»: tezisy dokl. (Moskva, 12–14 maja 2016 g.). URL: <http://ieeep.tpu.ru/hse/papers/462fu5u.pdf>.
3. Patent RF № 0000142368, 27.06.2014 / Gavrish P.E., Ljanzburg V.P., Muravjatkin Ju.E. Dvuhkanalnyj preobrazovatel ugla povorota vala v kod dvuhotschetnogo SKT s proizvolnym chislom jelektricheskoj redukcii/Patent Rossii no. 142368.2014. Bjul. no. 18.
4. Petropavlovskij V.P., Sinicyn N.V. Fazovye cifrovye preobrazovateli ugla. M.: Mashinostroenie, 1984. 136 p.
5. Shandrov B.V. Tehnicheskie sredstva avtomatizacii: uchebnik dlja studentov vysshih uchebnyh zavedenij. Moskva. Izdatelskij centr «Akademija», 2007. 368 p.