

УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В СЛЕДЯЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ФАЗЫ В КОД С ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Аксененко В.Д., Аксененко Д.В.

ФГУП ЦНИИ «Электроприбор»
197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30

Следящие преобразователи традиционно используются для прецизионного преобразования разности фаз в код. В истории развития преобразователей этого класса можно выделить несколько технологических этапов с реализацией преобразования на основе электромеханических [1], электронных аналого-цифровых [2] следящих систем и следящих систем с программной реализацией части алгоритма [3]. Повышение производительности средств вычислительной техники обеспечило возможность создания следящих преобразователей разности фаз в код с программной реализацией всего алгоритма на основе цифровых сигнальных процессоров [4,5]. Преобразователи такого типа можно рассматривать как один из видов устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС), обеспечивающий не только фильтрацию сигналов, но и выделение информации о значении их основных параметров.

В настоящей работе рассматриваются особенности применения ряда типовых методов уменьшения динамической погрешности при программной реализации алгоритма преобразования.

Рассматриваемые преобразователи являются системами переменного тока, в которых для выявления рассогласования осуществляется перемножение входного сигнала с сигналом обратной связи. Результат перемножения двух сигналов переменного тока с одинаковыми частотами содержит полезную составляющую с разностной (нулевой) частотой и вредную переменную составляющую с удвоенной частотой. Рассогласование в рассматриваемых преобразователях выявляется посредством вычисления свертки сигналов, при этом эффективным средством подавления переменной составляющей является усреднение результата на периоде сигнала [5].

Выявленное рассогласование обрабатывается в соответствии с выбранным законом управления для изменения выходной величины и формирования соответствующего сигнала обратной связи. Выходная величина формируется с ошибкой Δ , зависящей от характера изменения входной величины во времени, а также от структуры и параметров элементов следящей системы:

$$\Delta(t) = C_0 * X(t) + C_1 * \frac{dX(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} * \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \dots,$$

где C_0 , C_1 , C_2 – коэффициенты ошибки по соответствующим производным входного воздействия.

Значения коэффициентов ошибки определяются частными производными передаточной функции системы [6]:

$$C_0 = [\Phi(p)]_{p \rightarrow 0}; \quad C_1 = \left[\frac{d\Phi(p)}{dp} \right]_{p \rightarrow 0}; \quad C_2 = \left[\frac{d^2 \Phi(p)}{dp^2} \right]_{p \rightarrow 0}.$$

В астатических системах первого порядка коэффициенты ошибки принимают следующие значения:

$$C_0 = 0; \quad C_1 = \frac{1}{K}; \quad C_{i>1} = \frac{1}{K} + F(K, T_j),$$

где K – коэффициент усиления разомкнутого контура,
 T_j – постоянные времени звеньев системы.

Повышение коэффициента усиления K и уменьшение T_j для уменьшения динамической погрешности ограничивается в следящих преобразователях с программной реализацией не только необходимостью подавления переменной составляющей сигнала рассогласования, но и циклическим характером решения задачи, т.е. следящие системы в этих преобразователях – импульсные, а не непрерывные. Одним из условий обеспечения устойчивости импульсных систем является малость частоты среза по сравнению с частотой замыкания [7]. Рассмотрим возможности применения ряда структурных методов для уменьшения динамической погрешности.

Повышение степени астатизма системы

Повышение степени астатизма обеспечивается введением в контур регулирования дополнительных интегрирующих звеньев. Ухудшения устойчивости удастся избежать при повышении порядка астатизма с помощью изодромных звеньев, если сопрягающую частоту звена выбирать в 3-5 раз ниже частоты среза системы. Однако такой выбор ограничивает эффект от введения изодромного звена: эквивалентный коэффициент усиления разомкнутого контура системы на частоте f_s воздействия может быть повышен в $K_s/3$ - $K_s/5$ раз, где K_s – коэффициент усиления исходного контура на частоте f_s .

В преобразователях с высокой частотой решения задачи (частотой замыкания), для которых частота f_0 среза много больше частоты входного воздействия f_s , применение изодромного звена может быть достаточным для получения требуемой точности. Указанный метод привлекателен простотой алгоритма и малыми затратами вычислительных ресурсов. Для его реализации в алгоритм добавляется вычислительный блок вида: $\Delta_i'' = \Delta_{i-1}'' + K * \Delta_i''$; $\Delta_i' = \Delta_i + \Delta_i''$, где Δ_i' - значение рассогласования системы в i -м цикле вычислений; Δ_i'' - величина на выходе изодромного звена.

Компенсация погрешности рассогласованием системы

Довольно простым в реализации методом повышения точности является использование рассогласования для компенсации динамической погрешности. Предпосылкой для него является фундаментальное свойство следящей системы с управлением по отклонению, а именно формирование рассогласования, как разности между входным воздействием X и выходной реакцией Y системы. В следящей системе в том или ином виде присутствует (вырабатывается, формируется, вычисляется) значение рассогласования, которое равно ошибке формирования выходной реакции. Идея такого метода компенсации не нова, достаточно упомянуть, например, [8], однако ее реализация осложнялась разнородностью представленных величин, что требовало дополнительных преобразований. При программной реализации преобразования упрощаются, поскольку здесь как выходная реакция, так и рассогласования представлена в численном виде.

Осложняющим обстоятельством при использовании этого метода является невозможность практической реализации идеального разностного звена для измерения рассогласования в рассматриваемых системах. Как правило, сравнение входного воздействия с выходной реакцией осуществляется более сложным устройством (или алгоритмом) с некоторой передаточной функцией $W_1(p) = K * W_1^*(p)$, где K отражает крутизну преобразования информационного параметра, а $W_1^*(p)$ учитывает инерционность этого процесса. Выходная информация реального измерителя рассогласования в результате отличается от разности между X и Y . Для использования этой информации [3] для коррекции Y с целью устранения динамической погрешности ее необходимо преобразовать в эквивалент рассогласования, т.е. передать на выход через звено с передаточной функцией $W_2(p) = \frac{1}{W_1(p)} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{W_1^*(p)}$.

Величина K зависит от неинформативных параметров входного сигнала (в частности, амплитуды), которые могут иметь значительный разброс у сигналов и существенно изменяться в процессе эксплуатации системы. Функция $W_1^*(p)$ имеет, как правило, интегрирующий характер, обратная ей функция $W_2^*(p) = 1/W_1^*(p)$ с дифференцирующим характером будет способствовать подъему и передаче на выход всех высокочастотных помех, приложенных ко входу системы, тем самым увеличивая соответствующую составляющую погрешности.

Тем не менее, рассмотренный метод целесообразен для частичной (с учетом нестабильности K) компенсации динамической погрешности в тех системах, где инерционность измерителя рассогласования незначительна по сравнению с динамикой входного воздействия и можно обойтись без умножения на $W_2^*(p)$. Эффективность компенсации погрешности может быть повышена путем измерения неинформативных параметров сигнала и соответствующего нормирования величины K . Однако при этом необходимо учитывать, что компенсирующий сигнал содержит все те помехи, которые в основном канале фильтруются следящей системой. Для уменьшения влияния помех без снижения эффективности компенсации в корректирующую цепь может быть включен фильтр высокого порядка с полосой пропускания, равной рабочей полосе системы. Компенсация осуществляется вне контура следящей системы и высокий порядок фильтра не повлияет на ее устойчивость.

Итерационные следящие системы

Более полную компенсацию динамической погрешности обеспечивают итерационные следящие системы [9]. Здесь в основном контуре вырабатывается первичная оценка Y' входного воздействия X , причем $Y' = X - \Delta'$. Далее первичная оценка Y' вводится во второй (корректирующий) контур, где используется при формировании вторичной (уточненной) оценки $Y'' = Y' + \Delta Y'' = X - \Delta''$.

По существу входным воздействием для второго контура является ошибка Δ' первого контура, которая обрабатывается вторым контуром с соответственно меньшей погрешностью Δ'' .

Вторичная оценка Y'' может аналогичным образом введена в третий контур для дальнейшего уточнения оценки входного воздействия X , однако для большинства практических применений достаточно двухконтурной системы. Как показано в [9], порядок астатизма такой системы равен сумме порядков астатизма первого и второго контуров, а эквивалентный коэффициент усиления равен произведению их разомкнутых коэффициентов усиления. Выражения коэффициентов ошибки для двухконтурной итерационной системы при выполнении каждого из контуров в виде астатической системы первого порядка могут быть записаны в следующем виде:

$$C_0 = 0; \quad C_1 = 0; \quad C_2 = \frac{1}{K_1 * K_2}; \quad C_{i>2} = \frac{1}{K_1 * K_2} \times F(K_1, K_2, T_{j1}, T_{j2}),$$

где K_1, K_2, T_{j1}, T_{j2} - коэффициенты усиления и постоянные времени первого и второго разомкнутых контуров.

В итерационных системах автоматически устраняются ограничения по степени компенсации погрешности, связанные с зависимостью коэффициента преобразования измерителя рассогласования от неинформативных параметров сигнала, поскольку в контурах используются идентичные измерители рассогласования, а единичная обратная связь контуров унифицирует коэффициенты передачи замкнутых контуров. Аналогичным образом устраняются проблемы, связанные с выравниванием частотных характеристик канала отработки воздействия и канала компенсации динамической ошибки. Здесь уравнивание достигается идентичностью выполнения контуров итерационной системы.

Итерационный принцип позволяет одновременно с улучшением точности в динамических режимах существенно поднять помехоустойчивость систем за счет сужения полосы пропускания отдельных контуров и всей системы в целом [2].

Программная реализация алгоритма в современных преобразователях на основе устройств цифровой обработки сигналов позволяет достичь повышения точности без дополнительных аппаратных затрат. Однако реализация итерационного алгоритма в программной области требует дополнительных вычислительных ресурсов. Объем вычислений в двухконтурной системе в 2 раза больше, чем в одноконтурной, что приводит к снижению частоты решения задачи и, соответственно, ухудшает динамические характеристики отдельных контуров. Применение итерационного алгоритма целесообразно в преобразователях, где имеются неиспользуемые вычислительные ресурсы, достаточные для выполнения дополнительных вычислений без снижения частоты решения задачи. Производительность современных цифровых вычислительных средств неуклонно возрастает, что делает итерационный подход перспективным методом улучшения динамических характеристик систем с программной реализацией алгоритма.

Необходимо также отметить, что возможности данного подхода не безграничны. Увеличение числа контуров приводит к повышению колебательности итерационной системы даже при апериодическом характере реакции отдельных контуров.

Эффективность применения рассмотренных методов для уменьшения динамической погрешности преобразователей разности фаз в код подтверждена результатами моделирования в комплексе Simulink системы MathLab.

Таким образом, типовые методы улучшения динамических характеристик систем управления могут с успехом использоваться в следящих преобразователях разности фаз в код с программной реализацией алгоритма.

При выборе метода компенсации динамической погрешности необходимо учитывать особенности конкретной задачи: соотношение между частотой входного воздействия и реализуемой полосой системы, соотношение между входным сигналом и помехами, наличие в системе вычислительных ресурсов для решения задачи коррекции.

Литература

- 1 Зверев А.Е., Максимов В.П., Мясников В.А. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код. Л., «Энергия», 1974.
- 2 Аксененко В.Д. Фазовые следящие аналого-цифровые преобразователи угла, Л., ЦНИИ «Румб», 1989.
- 3 Аксененко В.Д., Дорофеев А.Н. Следящий преобразователь фаза-код для БИНС на ЭСГ.- Гироскопия и навигация, 1996г, №3.
- 4 Аксененко В.Д., Аксененко Д.В. Преобразователь фазы в код на базе сигнального процессора.- Гироскопия и навигация, 1999г, №2.
- 5 Аксененко В.Д., Аксененко Д.В. Цифровая обработка сигналов при определении разности фаз. Доклады 4-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М., 2002, т.2.
- 6 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М., «Наука», 1975.
- 7 Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. М., Физматгиз, 1963.
- 8 Иконникова М.Б. Применение метода прямого уравнивания для измерения фазы переменного напряжения. Сб. «Электроизмерительная техника» (ученые записки), вып.3, Пензенский ПТИ, 1966.
- 9 Осмоловский П.Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. М., «Советское радио», 1969.



DYNAMIC ERROR DECREASING IN TRACKING PHASE-TO-DIGIT CONVERTERS WITH SOFTWARE IMPLEMENTATION OF INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

Axenenko V., Axenenko D.

Central Scientific & Research Institute Elektropribor, St Petersburg

Tracking converters are traditionally used to convert some quantities, phase differences, in particular, to digits with high precision. The increase in productivity of computer aids made it possible to develop tracking converters using software that allows implementation of the whole algorithm on the basis of digital signal processors.

The hardware, the converters are built around, is a standard data acquisition system employed for digital signal processing. The software support for the conversion algorithm allows the hardware used to measure various parameters of the signal to be unified. The structure and operational principle of converters with software support for information processing algorithms are described.

The aim of this paper is to analyze the peculiarities of using standard methods to reduce the dynamic error as they are conditioned by implementation of the conversion algorithm in the software domain.

To reveal the error in the AC servo system, the input signal is multiplied by the feedback signal. In digital servo systems of converters the error is revealed by calculating convolution of signals, the efficient method for suppression of the variable component being averaging of the result over the period of signal.

The error revealed is processed in accordance with the chosen control law in order to change the output value, in case the information parameters of input signals change, and form an adequate feedback signal. The output value in the converters under consideration is the estimate of the input value (phase difference) to be converted. The output value is formed with an error Δ that depends both on the way the output value changes in time and the structure and parameters of the servo system component parts.

The peculiarity of tracking converters with software support for the algorithm implementation is the cyclic character of the equation solution, i.e. the servo systems used in these converters systems are pulse rather than continuous. Considered are a number of methods used to reduce the dynamic conversion error: increase in the astaticism level by using PI elements, introduction of iterative refinement of the estimate in auxiliary servo loops and dynamic error compensation by adding error revealed. The efficiency of using these methods in converters with software support for the algorithm implementation is analyzed.

Dynamic characteristics are studied to estimate the accuracy of conversion under the preset parameters of the change in the input value. The type actions like a jump, steady-speed motion, rocking allow estimating the basic dynamic characteristics of converters. The results obtained for the simulation of processes attendant to type input actions are given.