

На правах рукописи

Матвеев Сергей Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в государственном научном центре Российской Федерации
федеральном государственном унитарном предприятии
ЦНИИ "ЭЛЕКТРОПРИБОР"

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, Аксененко Виктор Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Кракау Татьяна Константиновна

Кандидат технических наук, доцент, Боронахин Александр Михайлович

Ведущая организация:

ОАО Концерн Гранит-Электрон , г. Санкт-Петербург

Защита состоится 4 декабря 2008 г. в 16 часов 0 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.18 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.18,

кандидат технических наук

Васильев А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Цифровые преобразователи угла (АЦПУ), построенные по принципу “угол-параметр-код” на индукционных синусно-косинусных датчиках угла (СКДУ) типа синусно-косинусный вращающийся трансформатор, редуктосин или индуктосин, широко используются для высокоточного преобразования угла поворота осей в различных технических объектах, таких как оптоэлектронные приборы, манипуляторы, автоматические системы управления и диагностики, навигационные системы и аналогичные им. Уменьшение массогабаритных показателей технических объектов при сохранении или одновременном повышении их технических характеристик является одной из общих тенденций и задач развития техники. Это уменьшение может быть достигнуто за счёт миниатюризации составных частей технических объектов, в частности, СКДУ и вторичного электронного преобразователя угла (RDC). Однако существенное уменьшение размеров СКДУ и RDC приводит к увеличению их погрешности и соответственно к снижению точности АЦПУ в целом.

Одним из путей повышения точности малогабаритного АЦПУ является компенсация его погрешности за счёт реализации автоматической коррекции выходной информации АЦПУ по двум каналам преобразования угла, построенным на СКДУ с различным числом пар полюсов. Известные современные способы и методы программной и аппаратной реализации указанной автоматической коррекции не в полной мере обеспечивают компенсацию погрешности в статическом и динамических режимах работы, особенно в малогабаритных исполнениях АЦПУ, а также не обеспечивают эту компенсацию при ограничении рабочего диапазона угловых перемещений ротора СКДУ.

Коррекция выходной информации АЦПУ, как правило, выполняется микропроцессорами, входящими в состав RDC. Их производительность в настоящее время позволяет не только корректировать выходную информацию

АЦПУ, но и решать задачу построения малогабаритного RDC за счёт реализации цифровой обработки сигналов СКДУ и отказа от аппаратно-функционального исполнения вторичного преобразователя угла. В то же время известные алгоритмы функционирования RDC с цифровой обработкой сигналов СКДУ обладают рядом недостатков: низкой помехоустойчивостью и точностью. Таким образом, является весьма актуальным проведение исследований путей повышения точности АЦПУ типа “угол-параметр-код” за счёт программной, алгоритмической и аппаратной автоматической коррекции погрешности АЦПУ наряду со снижением требований к точности малогабаритных СКДУ и выработка научно-технических решений по повышению характеристик малогабаритных RDC.

Целью работы является исследование путей и выработка научно-технических решений по повышению точности малогабаритных цифровых преобразователей угла.

Основные задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Проведение исследований и разработка алгоритмов работы вторичных преобразователей угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ.
2. Анализ влияния амплитуд составляющих исходной систематической погрешности на точность автоматической коррекции выходной информации АЦПУ.
3. Разработка методов автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, повышающих точность этой коррекции.
4. Разработка методов автономного оценивания погрешности АЦПУ в ограниченном рабочем диапазоне угловых перемещений ротора СКДУ.
5. Анализ влияния динамики изменения угла поворота ротора СКДУ на точность коррекции выходной информации АЦПУ.
6. Разработка способов повышения точности компенсации погрешности АЦПУ в динамических режимах работы.

Методы исследования. В работе использованы методы теории цифровой обработки сигналов, теории автоматического управления, теории вероятности и случайных процессов, численное моделирование и эксперимент.

Научная новизна:

– предложены структура и алгоритм работы следящего вторичного преобразователя угла с многочастотной цифровой обработкой сигналов СКДУ, обладающего повышенной точностью преобразования при незначительных необходимых для реализации ресурсах;

– показано, что повышение устойчивости следящих вторичных преобразователей угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ к импульсной помехе, без ухудшения точности преобразования, обеспечивается медианной фильтрацией выпрямленного сигнала рассогласования;

– разработаны методы автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, повышающие точность компенсации погрешности малогабаритного АЦПУ с использованием двух каналов преобразования угла и с применением для их построения СКДУ с различным числом пар полюсов, реализующие итерационные процедуры оценивания и компенсации погрешности АЦПУ и учитывающие особенности пространственного спектра зависимости погрешности АЦПУ от его выходной информации;

– разработан метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ в ограниченном рабочем диапазоне угловых перемещений ротора СКДУ, обеспечивающий разделение погрешностей каналов преобразования при пространственной фильтрации разностной погрешности последних;

– показано, что точность компенсации погрешности АЦПУ в динамических режимах работы повышается при введении по цепи обратной связи поправки в виде данных автоматической коррекции выходной информации АЦПУ.

Практическая ценность. Предложенные структуры и алгоритмы работы

следящих вторичных преобразователей угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ позволяют создавать точные помехоустойчивые малогабаритные АЦПУ. Разработанные методы автоматической коррекции позволяют использовать малогабаритные СКДУ с относительно большой погрешностью для создания прецизионных АЦПУ, а также существенно повысить точность АЦПУ при работе в ограниченном диапазоне угловых перемещений ротора СКДУ. Предложенный способ компенсации погрешности АЦПУ в динамических режимах работы позволяет повысить точность преобразования угла.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы и внедрены в изделия “Парус-98” и приборе ПГУ производства ЦНИИ “Электроприбор”.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура, программная реализация и алгоритм работы следящего вторичного преобразователя угла с многочастотной цифровой обработкой сигналов СКДУ.

2. Структура и алгоритм работы следящего вторичного преобразователя угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ, обладающего повышенной устойчивостью к импульсной помехе без снижения точности, за счёт медианной фильтрации сигнала рассогласования.

3. Методы автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, реализующие итерационные процедуры оценивания и компенсации погрешности АЦПУ и учитывающие особенности пространственного спектра зависимости погрешности АЦПУ от его выходной информации.

4. Метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, предусматривающий для оценивания погрешности в ограниченном угловом диапазоне пространственную фильтрацию разностной погрешности каналов преобразования.

5. Способ повышения точности компенсации погрешности АЦПУ в

динамических режимах работы, использующий введение по цепи обратной связи поправки в виде данных автоматической коррекции выходной информации АЦПУ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 2-й, 4-й, 6-й конференциях молодых учёных “Навигация и управление движением” (Санкт-Петербург, 2000, 2002, 2004); на 2-й международной конференции “Кибернетика и технологии 21 века” (Воронеж, 2001); на 11-м и 12-м международных научно-технических семинарах “Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации” (Алушта, 2002, 2003); на 3-м международном симпозиуме “Аэрокосмические приборные технологии” (Санкт-Петербург, 2004); на 24-й научно-технической конференции памяти Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург, 2004); на международных конференциях International Signal Processing Conference (Dallas, 2003); IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, (Ottawa, 2005); “Radio – That Connects Time. 110 Anniversary of Radio Invention” (Saint-Petersburg, 2005); 12th International Conference on Integrated Navigation Systems (Saint-Petersburg, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Библиографический список содержит 188 ссылок. Объём диссертации составляет 194 страницы, 48 рисунков и 45 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены её цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор современных методов аналого-цифрового преобразования угла поворота вала. В ней рассмотрены принципы действия кодирующих преобразователей угла, их конструктивные особенности, мет-

рологические характеристики, область применения преобразователей типа “угол-параметр-код”, построенных на индукционных СКДУ. В главе рассмотрены основные типы СКДУ, RDC с аппаратно-функциональным исполнением, методы повышения точности АЦПУ и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе анализируются известные и описываются предлагаемые вторичные преобразователи угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ, их программная реализация, алгоритмы функционирования, источники погрешности, динамические характеристики и помехоустойчивость. Структурная схема RDC с многочастотной цифровой обработкой сигналов СКДУ приведена на рис. 1. Генератор G1 вырабатывает сигнал возбуждения СКДУ, $r(t)$. Генератор G2 вырабатывает сигнал, задающий моменты дискретизации сигналов СКДУ. Частота сигнала генератора G2 в целое число раз выше частоты сигнала возбуждения, f_0 . Благодаря синхронной работе аналого-цифровых преобразователей АЦП1, АЦП2 полученные с их помощью мгновенные значения синусного и косинусного сигналов СКДУ описываются выражениями:

$$u[i] = E \cdot \sin(\eta) \sin\left(\frac{2\pi}{N} i + \varphi\right), \quad v[i] = E \cdot \cos(\eta) \sin\left(\frac{2\pi}{N} i + \varphi\right), \quad (1)$$

где η – электрический угол, E – максимальная амплитуда, φ – начальная фаза. Звеньями F1, F2 с частотой f_0 формируются оценки амплитуд сигналов СКДУ:

$$U[n] = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u[i] \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} i + \varphi\right), \quad V[n] = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v[i] \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} i + \varphi\right). \quad (2)$$

Упрощение выражений (2) даёт: $U[n] = E \cdot \sin(\eta)$, $V[n] = E \cdot \cos(\eta)$. Оценки амплитуд, полученные по формулам (2), нечувствительны к э.д.с. вращения. В них значительно подавлен шум квантования.

По оценкам амплитуд сигналов СКДУ вычисляется рассогласование:

$$d[n] = U[n] \cos(\mu[n-1]) - V[n] \sin(\mu[n-1]) \cong E \cdot (\eta - \mu[n-1]), \quad (3)$$

где μ – оценка электрического угла, n – номер такта работы. Затем оценка электрического угла корректируется, так чтобы свести рассогласование к нулю. Закон управления оценкой угла описывается звеном с передаточной

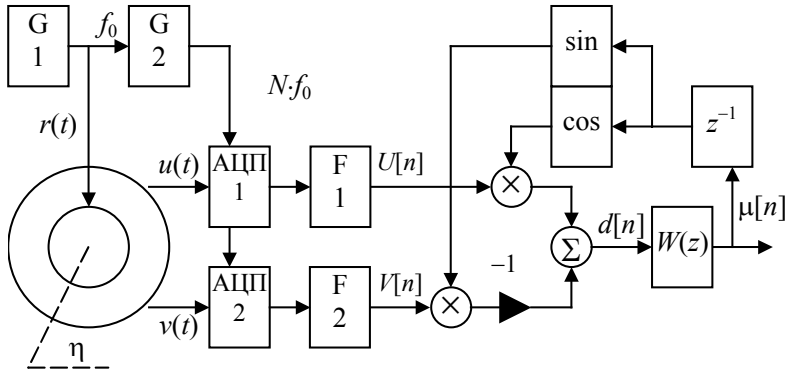


Рис. 1

функцией $W(z)$. В установившемся состоянии рассогласование равно нулю, поэтому $\mu \equiv \eta$.

В работе рассмотрены следующие источники инструментальной по-

грешности RDC с цифровой обработкой сигналов СКДУ: апертурное время АЦП, вычислительная погрешность реализации алгоритма преобразования, ограниченная разрядность АЦП, неравенство коэффициентов передачи в каналах аналого-цифрового преобразования сигналов СКДУ. Из перечисленных источников инструментальной погрешности наиболее важны два последних.

В условиях систематического искажения формы сигналов СКДУ в АЦП ограниченная разрядность АЦП приводит к систематической погрешности RDC с указанными в таблице 1 пределами изменения. Для условий случайного искажения формы сигналов СКДУ в АЦП получена статистическая оценка погрешности преобразования:

$$\Delta\mu_Q = \pm 2^{-Q} \sqrt{K \frac{f_{BW}}{f_0} \frac{6}{N}}, \quad (4)$$

где Q – число разрядов АЦП, f_{BW} – полоса пропускания RDC, K – коэффициент, зависящий от формы амплитудно-частотной характеристики RDC.

К неравенству коэффициентов передачи в каналах аналого-цифрового

преобразования сигналов СКДУ, главным образом, приводит разброс параметров аналоговых фильтров, если они установлены на входах АЦП (см. ниже). В случае использования фильтров первого порядка ими вносятся погрешность:

$$\Delta\mu_G = \delta T_V \left(\frac{f_0}{f_V}\right)^2 \sin(2\eta), \delta T_V = \frac{T_{VS} - T_{VC}}{2T_V}, T_V = \frac{T_{VS} + T_{VC}}{2}, f_V = \frac{2\pi}{T_V}, \quad (5)$$

где T_{VS}, T_{VC} – постоянная времени фильтра синусного, косинусного сигнала.

Таблица 1. Влияние разрядности АЦП

Число разрядов АЦП	Диапазон изменения погрешности			
	$N = 8$	$N = 16$	$N = 32$	$N = 64$
8	$\pm 1127,8''$	$\pm 950,9''$	$\pm 812,1''$	$\pm 812,1''$
12	$\pm 80,9''$	$\pm 64,7''$	$\pm 54,8''$	$\pm 50,4''$
16	$\pm 5,2''$	$\pm 4,7''$	$\pm 3,7''$	$\pm 3,1''$

В работе рассмотрено влияние алгоритма преобразования и частоты формирования выходной информации на динамические характеристики RDC с цифровой обработкой сигналов СКДУ. Показано, что если АЦПУ с таким RDC является инициатором обмена информацией, влияние частоты формирования оценок угла и времени их вычисления устраняется экстраполяцией, которая обеспечивается запаздыванием в цепи обратной связи RDC.

Устойчивость RDC с цифровой обработкой сигналов к широкополосной помехе может быть обеспечено конструктивными методами, например, экранированием линий связи с СКДУ, а также с помощью аналоговой фильтрации сигналов СКДУ. Выше показано, что неравенство параметров аналоговых фильтров приводит к погрешности (5), поэтому необходим другой способ повышения помехоустойчивости RDC с цифровой обработкой сигналов СКДУ.

Устойчивость RDC с цифровой обработкой сигналов СКДУ к импульсной помехе, которая также обладает широким спектром, позволяет повысить медианная фильтрация выпрямленного сигнала рассогласования. Структурная схема RDC с указанным алгоритмом функционирования приве-

дена на рис. 2. Сигналы СКДУ синхронно обрабатываются в преобразователях АЦП1...АЦП3. Сигнал возбуждения СКДУ, $r(t)$, обрабатывается в

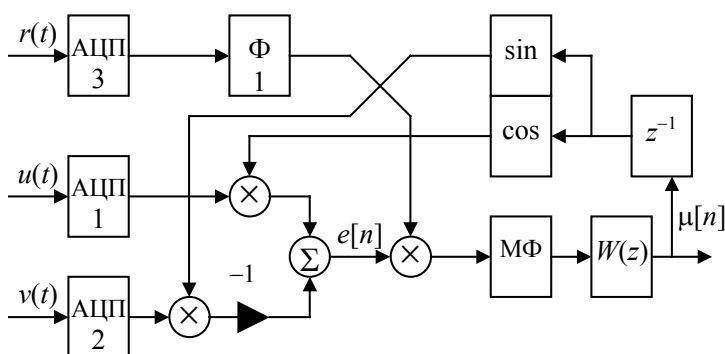


Рис. 2

фильтре $\Phi 1$, где из него удаляются высшие гармоники, а фаза подстраивается к фазе выходных сигналов СКДУ $u(t)$, $v(t)$. Из сигналов $u(t)$, $v(t)$ формируется переменный сигнал рассогласования, $e[n]$:

$$e[n] \cong E \cdot (\eta - \mu[n-1]) \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot n / f_s + \varphi), \quad (6)$$

где f_s – частота дискретизации. Переменный сигнал рассогласования выпрямляется умножением на выходной сигнал фильтра $\Phi 1$. Переменная составляющая выпрямленного сигнала рассогласования мала в установившемся состоянии, поэтому импульсы помехи хорошо различимы на её фоне, и существенно подавляются медианным фильтром. В результате достигается повышение помехоустойчивости без использования аналоговых фильтров, а значит, без ухудшения точности преобразования. Постоянная составляющая выпрямленного сигнала рассогласования проходит на выход медианного фильтра без искажений, и используется звеном $W(z)$ для управления оценкой угла.

В третьей главе описываются методы автоматической коррекции выходной информации АЦПУ. Они развивают известный метод¹⁾, использующий связь пространственного спектра погрешности АЦПУ с числом пар полюсов СКДУ в точном отсчёте:

¹⁾ Сафонов, Л. Н. Измерители перемещений на основе двух разнополюсных датчиков // Измерительная техника. – 1985. – №11. – С. 12–13.

$$\Delta\alpha = f(\theta) = \sum_n A_{n \cdot p} \sin(n \cdot p \cdot \theta + \psi_{n \cdot p}) + \sum_{m, m \neq n \cdot p} A_m \sin(m \cdot \theta + \psi_m), \quad (7)$$

где $\Delta\alpha$ – систематическая погрешность оценки угла; θ – угол поворота вала; p – число пар полюсов; A, ψ – амплитуды и фазы пространственных гармоник погрешности. В погрешности АЦПУ доминирует внутрипериодная составляющая, которая описывается первой суммой выражения (7).

Для автоматической коррекции в состав АЦПУ вводят дополнительный канал преобразования угла θ , в точном отсчёте которого используется СКДУ с числом пар полюсов q , ($q \neq p$). На подготовительном этапе – этапе автономного оценивания, формируется выборка разностной погрешности (разности оценок угла в каналах преобразования), для чего разностная погрешность списывается в M опорных угловых положениях через $(360/M)^\circ$. Достижение опорных угловых положений определяется по одному из каналов преобразования принимаемого за опорный. По выборке разностной погрешности с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) вычисляются амплитуды и фазы гармоник внутрипериодной погрешности каналов. Компенсация погрешности проводится в рабочем режиме, когда по текущей оценке угла и параметрам погрешности, определённым на этапе автономного оценивания, с помощью обратного преобразования Фурье вычисляется значение погрешности, которое вычитается из оценки угла.

В главе 3 проанализировано влияние амплитуд составляющих исходной систематической погрешности на точность автоматической коррекции выходной информации АЦПУ. С их ростом начинает сказываться различие зависимости разностной погрешности от угла поворота вала и зависимости разностной погрешности от выходной информации опорного канала. Этим различием пренебрегают в известном методе автоматической коррекции выходной информации АЦПУ с использованием двух каналов преобразования угла, однако параметры пространственных гармоник именно последней зави-

симости измеряются входе автономного оценивания погрешности.

Зависимость разностной погрешности от выходной информации опорного канала описывается суммой гармоник с модулированной частотой:

$$\Delta D = \alpha - \beta \cong \sum_m D_m \cdot \sin(m \cdot (\alpha - f(\alpha)) + X_m), \quad (8)$$

где β – оценка угла по дополнительному каналу преобразования; D, X – амплитуды и фазы пространственных гармоник разностной погрешности; α – выходная информация опорного канала. Из-за модуляции при больших амплитудах составляющих систематической погрешности опорного канала оценки параметров пространственных гармоник погрешности существенно отличаются от истинных значений. Кроме того, при больших амплитудах составляющих исходной систематической погрешности использование оценки угла в качестве аргумента обратного преобразования Фурье не позволяет полностью скомпенсировать погрешность даже при точно известных параметрах её гармоник.

В главе 3 описан метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, повышающий точность компенсации погрешности малогабаритного АЦПУ с использованием двух каналов преобразования угла, реализующий итерационные процедуры оценивания и компенсации погрешности АЦПУ. Итерационная процедура компенсации предусматривает вычисление скорректированных оценок угла по формуле:

$$\alpha_{Ik} = \alpha - \sum_i A_i \sin(i \cdot \alpha^{I(k-1)} + \psi_i), k = 1, 2 \dots; \alpha^{I0} = \alpha, \quad (9)$$

где k – номер итерации. Она позволяет существенно повысить точность компенсации погрешности, а при точно известных параметрах гармоник погрешности позволяет полностью её скомпенсировать.

В итерационной процедуре оценивания достижение опорных угловых положений определяется по скорректированным оценкам угла, вычисленным

по формуле (9), за счёт чего снижается погрешность опорного канала, а значит, повышается точность измерения параметров гармоник погрешности. В качестве коэффициентов формулы (9) используются оценки параметров гармоник погрешности, полученные на предыдущей итерации в оценивании погрешности. Оценивание погрешности на первом шаге проводится традиционным способом. Благодаря более точному измерению коэффициентов формулы (9) с ростом числа итераций в оценивании достигается уточнение оценок параметров гармоник погрешности

В главе 3 описан метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, повышающий точность компенсации погрешности малогабаритного АЦПУ, учитывающий особенности пространственного спектра зависимости погрешности АЦПУ от его выходной информации. Измеренный в результате автономного оценивания традиционным способом спектр состоит из гармоник зависимости погрешности опорного канала от его выходной информации и гармоник зависимости погрешности дополнительного канала от выходной информации опорного канала. Номера существенных гармоник первой зависимости кратны числу пар полюсов СКДУ в точном отсчёте аттестуемого канала. По сравнению с гармониками, образующими внутривнутриодную погрешность, этих гармоник в несколько раз больше, а их параметры незначительно искажены гармониками второй зависимости.

В предлагаемом методе автоматической коррекции выходной информации АЦПУ выборка разностной погрешности формируется с опорой на выходную информацию аттестуемого канала, из измеренного спектра выделяются амплитуды и фазы всех существенных гармоник с номерами $(n \cdot p)$, где p – число пар полюсов СКДУ в точном отсчёте аттестуемого канала, а скорректированная выходная информация вычисляется по формуле:

$$\alpha^F = \alpha - \sum_i A_i^{FA} \sin(i \cdot \alpha + \psi_i^{FA}), \quad (10)$$

где A^{FA}_i, ψ^{FA}_i – выделенные оценки амплитуд и фаз; α – выходная информация аттестуемого канала. Повышение точности автоматической коррекции выходной информации достигается благодаря компенсации большего числа гармоник зависимости погрешности АЦПУ от его выходной информации.

В главе 3 описывается метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ в ограниченном рабочем диапазоне угловых перемещений ротора СКДУ. При сборе данных в ограниченном угловом диапазоне невозможно разделить гармоники внутрипериодной погрешности, принадлежащие разным каналам, с помощью ДПФ, как в известном методе. Пространственная фильтрация разностной погрешности позволяет выйти из сложившейся ситуации. С её помощью подавляются гармоники внутрипериодной погрешности одного из каналов, тем самым решается задача разделения погрешностей каналов. В главе рассмотрены различные алгоритмы пространственной фильтрации. Лучшим из них, с точки зрения уменьшения влияния систематических и случайных искажающих факторов, является алгоритм, использующий параметризованный режекторный фильтр. В этом случае пространственная фильтрация сводится к обработке выборки разностной погрешности по формуле:

$$\Delta D_{T\xi}[i] = \Delta D[i] - \Delta D[i + \zeta \cdot \xi \cdot p], i = 0, \dots, (\zeta \cdot q \cdot Z - 1), \quad (11)$$

где $\Delta D[i]$ – значение разностной погрешности в i -ом опорном угловом положении; p – число пар полюсов СКДУ в точном отсчёте аттестуемого канала; q – число пар полюсов СКДУ в точном отсчёте дополнительного канала; ξ – параметр фильтра; ζ, Z – параметры алгоритма автономного оценивания. Первый из параметров алгоритма автономного оценивания определяет частоту списывания разностной погрешности, которая должна составлять $(\zeta \cdot q \cdot p)$ значений на оборот. Параметр Z определяет по скольким периодам выходного сигнала пространственного фильтра вычисляются параметры внутрипери-

одных гармоник аттестуемого канала. Параметр ξ определяет частотные характеристики пространственного фильтра:

$$G_{T\xi}(k) = 2 \left| \sin\left(k \frac{\pi}{q} \xi\right) \right|, \quad P_{T\xi}(k) = -k \frac{\pi}{q} \xi + \frac{\pi}{2} + \pi \cdot \left[\frac{k \cdot \xi}{q} \right], \quad (12)$$

где квадратные скобки обозначают операцию выделения целой части. Параметры гармоник внутрипериодной погрешности аттестуемого канала определяются с помощью ДПФ:

$$\begin{aligned} a_{n \cdot p} &= \frac{2}{\zeta \cdot q \cdot Z} \sum_{i=0}^{\zeta \cdot q \cdot Z - 1} \Delta D_{T\xi}[i] \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\zeta \cdot q} n \cdot Z \cdot i\right)}{\cos\left(\frac{2\pi}{\zeta \cdot q} n \cdot Z \cdot i\right)}, \\ b_{n \cdot p} &= \frac{2}{\zeta \cdot q \cdot Z} \sum_{i=0}^{\zeta \cdot q \cdot Z - 1} \Delta D_{T\xi}[i] \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\zeta \cdot q} n \cdot Z \cdot i\right)}{\cos\left(\frac{2\pi}{\zeta \cdot q} n \cdot Z \cdot i\right)}, \\ c_{n \cdot p} &= \sqrt{a_{n \cdot p}^2 + b_{n \cdot p}^2}, \quad d_{n \cdot p} = \text{Arctg}(b_{n \cdot p} / a_{n \cdot p}), \end{aligned} \quad (13)$$

$$A_{n \cdot p}^{T\xi} = c_{n \cdot p} / G_{T\xi}(n \cdot p), \quad \Psi_{n \cdot p}^{T\xi} = d_{n \cdot p} - P_{T\xi}(n \cdot p) - n \cdot p \cdot (\alpha_0 + 2\pi \cdot \xi / q),$$

где α_0 – значение опорного углового положения, в котором начат сбор данных. Параметрами Z и ξ определяется угловой диапазон, на который должен быть повёрнут вал для проведения автономного оценивания погрешности:

$$\Delta\theta = 360^\circ \cdot (\xi / q + Z / p). \quad (14)$$

На точность автономного оценивания в ограниченном угловом диапазоне, в основном, влияют случайные искажающие факторы. Предлагается ряд процедур по уменьшению их влияния. Это многократная аттестация с усреднением ортогональных коэффициентов гармоник внутрипериодной погрешности, увеличение выборки разностной погрешности увеличением ζ или Z , изменение параметра пространственного фильтра, ξ , так чтобы увеличить амплитудно-частотную характеристику фильтра на пространственной частоте ($n \cdot p$).

В четвёртой главе проанализировано влияние динамики изменения угла поворота ротора СКДУ на точность коррекции выходной информации АЦПУ. Анализ проводился по структурной схеме АЦПУ с компенсацией

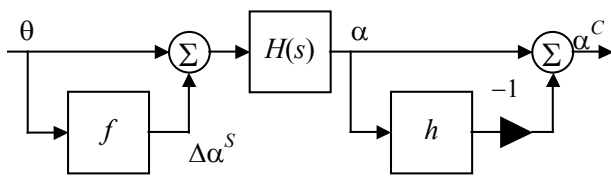


Рис. 3

погрешности (см. рис. 3). На этой структурной схеме звено с передаточной функцией $H(s)$ учитывает динамические свойства RDC. Звено с передаточной характеристикой f отображает возникновение погрешности, а звено с передаточной характеристикой h описывает алгоритм формирования поправки. Структурная схема на рис. 3 позволяет установить, что в динамических режимах точность компенсации погрешность уменьшается из-за искажения погрешности $\Delta\alpha^S$ динамическими звеньями АЦПУ.

Точность компенсации погрешности в динамических режимах работы позволяет повысить введение поправки по цепи обратной связи в сигнал рас-

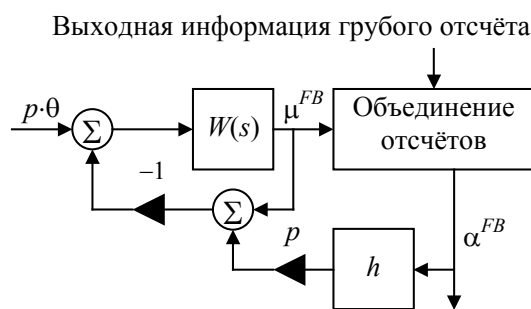


Рис. 4

согласования RDC. Благодаря этому погрешность АЦПУ компенсируется до динамических звеньев, и точность компенсации перестаёт зависеть от скорости изменения угла поворота ротора СКДУ. Схема алгоритма коррекции с введением поправки по цепи обратной связи приведена на рис. 4. На этой структурной схеме звено с передаточной функцией $W(s)$ отражает динамическое звено, на выходе которого формируется оценка электрического угла. Из выходной информации RDC, μ^{FB} , и оценки угла, сделанной в грубом отсчёте, формируется выходная информация АЦПУ, α^{FB} , которая уже скорректирована. Поправка, усиленная в число пар полюсов раз, p , вместе с выходной информацией RDC поступает на вход блока вычисления рассогласования, где компенсирует погрешность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования современных методов аналого-цифрового

преобразования угла поворота вала, в частности:

– рассмотрены принципы действия, конструктивные особенности, метрологические характеристики кодирующих преобразователей угла, область применения преобразователей типа “угол-параметр-код”, построенных на индукционных СКДУ;

– рассмотрены основные типы СКДУ, известные аппаратно-функциональные вторичные преобразователи угла и вторичные преобразователи угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ;

– проанализированы методы повышения точности АЦПУ.

2. Предложены структура, программная реализация и алгоритм работы следящего вторичного преобразователя угла с многочастотной цифровой обработкой сигналов СКДУ, обладающего повышенной точностью преобразования при незначительных необходимых для реализации ресурсах, исследованы основные источники его инструментальной погрешности и динамические характеристики.

3. Исследованы способы повышения помехоустойчивости следящих вторичных преобразователей угла с цифровой обработкой сигналов СКДУ и показано, что повышение их устойчивости к импульсной помехе, без ухудшения точности преобразования, обеспечивается медианной фильтрацией выпрямленного сигнала рассогласования. Предложенные программная реализация и алгоритмы работы следящих вторичных преобразователей внедрены в серийные изделия.

4. Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость погрешности АЦПУ от выходной информации этого либо другого канала преобразования угла. На основе указанного выражения проанализировано влияние амплитуд составляющих исходной систематической погрешности на точность автоматической коррекции выходной информации АЦПУ с использованием двух каналов преобразования угла, построенных на СКДУ с раз-

личным числом пар полюсов. Предложено два метода автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, реализующие итерационные процедуры оценивания и компенсации погрешности АЦПУ и учитывающие особенности пространственного спектра зависимости погрешности АЦПУ от его выходной информации. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что, в случае значительной исходной погрешности АЦПУ применение разработанных методов автоматической коррекции позволяет повысить её точность в несколько раз, что создаёт предпосылки для использования неточных СКДУ при построении точных малогабаритных АЦПУ.

5. Разработан метод автоматической коррекции выходной информации АЦПУ, защищённый патентом РФ, предусматривающий для оценивания погрешности в ограниченном угловом диапазоне пространственную фильтрацию разностной погрешности каналов преобразования. Проанализировано влияние случайных искажающих факторов на точность автоматической коррекции разработанным методом и предложены способы уменьшения указанного влияния. Экспериментальные исследования показали эффективность разработанного метода, а также способов снижения влияния случайных искажающих факторов.

6. Проанализировано влияние динамики изменения угла поворота ротора СКДУ на точность коррекции выходной информации АЦПУ. Показано, что точность компенсации погрешности АЦПУ в динамических режимах работы ухудшается из-за искажения параметров погрешности динамическими звеньями RDC. Предложен способ повышения точности коррекции в динамических режимах работы, предусматривающий введение поправки по цепи обратной связи в виде данных автоматической коррекции выходной информации АЦПУ. Экспериментальные исследования показали достоверность анализа причин снижения точности коррекции в динамических режимах и эффективность предложенного способа повышения точности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аксененко, В. Д. Особенности реализации преобразователя сигналов датчика угла в код на основе 16-разрядного сигнального процессора / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Навигация и управление движением : сб. докл. 2-й науч.-техн. конф. молодых учёных. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2000. – С. 230–233.

2. Аксененко, В. Д. Преобразователь угла в код на основе цифрового сигнального процессора / В. Д. Аксененко, Д. В. Аксененко, С. И. Матвеев // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44, № 8. – С. 37–42.

3. Аксененко, В. Д. Проблемы повышения точности преобразователей угла в код / В. Д. Аксененко, Д. В. Аксененко, С. И. Матвеев // Кибернетика и технологии 21-ого века : тр. 2-ой междунар. конф. – Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2001. – С. 171–182.

4. Аксененко, В. Д. Синхронное детектирование методами цифровой обработки сигналов / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Навигация и управление движением : сб. докл. 4-ой науч.-техн. конф. молодых учёных. – СПб. : Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2002. – С. 225–228.

5. Аксененко, В. Д. Бесконтактный малогабаритный преобразователь угловых перемещений / В. Д. Аксененко, О. К. Елифанов, С. И. Матвеев // Аэрокосмические приборные технологии : материалы 3-его междунар. симп. (Санкт-Петербург, 2 – 4 июня 2004 г.) – СПб. : СПбГУАП. – С. 341–343.

6. Аксененко, В. Д. Подавление импульсных помех в микропроцессорном преобразователе сигналов СКВТ в код угла / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Аэрокосмические приборные технологии : материалы 3-его междунар. симп. (Санкт-Петербург, 2 – 4 июня 2004 г.) – СПб. : СПбГУАП. – С. 156–159.

7. Аксененко, В. Д. Анализ влияния величины систематической погрешности аналого-цифрового преобразователя угла на точность её автокомпенсации / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев, И. В. Семёнов // Навигация и управление движением : материалы докл. 6-ой науч.-техн. конф. молодых учёных. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. – С. 236–241.

8. Аксененко, В. Д. Исследование погрешности преобразователя угол-код на основе редуктосина : реферат доклада с XXIV науч.-техн. конф. памяти Н. Н. Острякова (СПб., 2004) / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 1. – С. 103.

9. Аксененко, В. Д. Повышение точности автокалибровки преобразователей угол-код / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 10. – С. 41–46.

10. Аксененко, Д. В. Компенсируемые преобразователи угла на основе многополюсных вращающихся трансформаторов для прецизионных устройств автоматики / Д. В. Аксененко, А. В. Конев, С. И. Матвеев // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : тр. 12-ого междунар. науч.-техн. семинара (Алушта, Сент. 2003 г.). – М. : МЭИ, 2003. – С. 307–309.

11. Исследование погрешности преобразователей угла с микропроцессорной автокоррекцией / В. Д. Аксененко и др. // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 4. – С. 72–82.

12. Пат. 2266614 РФ, МПК⁷ Н 03 М 1/64. Способ преобразования угла поворота вала в код / В. Д. Аксененко, В. М. Зиненко, С. И. Матвеев (РФ) ; заявитель и патентообладатель ФГУП ЦНИИ "Электроприбор". – № 2004113332/09 ; заявл. 29.04.2004 ; опубл. 20.12.2005, Бюл. № 35. – 8 с.

13. Aksenenko, D. V. Digital Signal Processing in Angle-to-Digital Conversion / D. V. Aksenenko, V. D. Aksenenko, S. I. Matveev // International Signal Processing Conference : Conf. Proc. (Dallas, 31 Mar. – 3 Apr., 2003) – Newton Centre (MA) : Global Technology Conferences, 2002. – Режим доступа: www.gspix.com.

14. Aksenenko, V. D. Digital Angle Sensor Self-Calibration: Two Approaches to Accuracy Increasing / V. D. Aksenenko, S. I. Matveyev // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : Conf. Proc. (Ottawa, 16-19 May, 2005). – Los Alamitos (CA) : IEEE, 2005. – Vol. 1. – P. 543–547.

15. Aksenenko, V. D. Error Correction of Digital Angular Sensors in the Dynamic Mode / V. D. Aksenenko, S. I. Matveyev // Intern. Conf. “Radio – That Connects Time. 110 Anniversary of Radio Invention” : Conf. Proc. (St. Petersburg, May 18-21, 2005) ; Proc. of the IEEE Russia Northwest Section. – Los Alamitos (CA) : IEEE, 2005. – Vol. 2. – P. 58–63.

16. Development and Calibration of Angle Sensors With Micro-Processor Autocorrection / V. D. Aksenenko et al. // 12th International Conference on Integrated Navigation Systems : Conf. Proc. (Saint Petersburg, 23-25 May, 2005) – Saint Petersburg : State Research Center of Russia Elektropribor, 2005. – P. 267–273. – ISBN 5-900780-59-7.