



Ипполитова Евгения Викторовна

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ ЗА СЧЕТ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ ДАТЧИКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
БОШЛЯКОВ Андрей Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
проректор ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин»,
Заслуженный работник высшей школы РФ
ПОДУРАЕВ Юрий Викторович

кандидат технических наук, доцент,
нач. отдела ОАО "ГСКБ "Алмаз - Антей"
БЕСЕЛОВСКАЯ Ольга Александровна

Ведущая организация: открытое акционерное общество
«Корпорация космических систем
специального назначения «Комета»

Защита диссертации состоится «01» апреля 2014 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005 Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613М.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по адресу: 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан « »

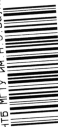
2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Муратов И

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2045415

Повышение точности систем

2

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительная часть образцов современной военной техники базируется на использовании различных цифровых систем управления (ЦСУ) угловым положением валов объекта регулирования. К современным ЦСУ предъявляются повышенные требования по качеству их работы – по точности и другим параметрам. Функциональные возможности ЦСУ военного и гражданского назначения во многом определяются характеристиками цифровых преобразователей угла (ЦПУ), используемых в качестве датчиков обратной связи. Усилиями предприятий РФ созданы различные ЦПУ, что отражено в «Перечне электрорадиоизделий, разрешенных к применению при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации аппаратуры, приборов, устройств и оборудования военного назначения» ФГУ «22 ЦНИИ Минобороны России». Однако анализ содержания соответствующего раздела данного перечня указывает на целесообразность проведения НИОКР по совершенствованию ЦПУ. На необходимость выполнения таких работ косвенно указывает и применение в отечественных ЦСУ зарубежных ЦПУ. Таким образом, задача разработки отечественных высокоточных ЦПУ на основе современной элементной базы является актуальной и важной как при проведении модернизации ЦСУ, так и при создании новых систем.

Направленность данной диссертационной работы заключается в совершенствовании амплитудных ЦПУ следящего типа. Эти устройства состоят из электромеханических двухфазных одноотсчетных либо двухотсчетных датчиков угла (ДУ) и электронных аналого-цифровых преобразователей выходных напряжений ДУ (АЦПДУ) в соответствующий двоичный код N углового положения α ротора ДУ. Точность таких ЦПУ в основном определяется функциональными зависимостями ДУ и АЦПДУ, которые при идеальном представлении описываются синусно-косинусными функциями.

Реальные ДУ характеризуются отличием выходных характеристик датчика от идеальных гармонических зависимостей. Это может быть различие в амплитудах синусного и косинусного каналов, нарушение ортогональности, наличие нечётных гармоник. Неидеальность характеристик ДУ приводит к ограничению точности ЦПУ на уровне в несколько угловых минут, даже при использовании синусно-косинусных АЦПДУ. Известен ряд способов повышения точности ЦПУ, представленных, например, в работах Ахметжанова А.А., Аксёненко В.Д., Глаголева И.П., Домрачева В.Г., Домрачева В.М., Сафонова Л.Н., Аша Ж., Вульвета Дж. и др. Однако каждый из этих способов имеет определённый порог достижимой точности преобразования угла в код.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является создание алгоритмов обработки информации, позволяющих разрабатывать ЦПУ повышенной точности с возможностью формирования точного скоростного сигнала и сигнала, характеризующего текущую погрешность преобразования.

Задачи исследования формулируются в соответствии с поставленной целью следующим образом:

1. Проведение анализа известных амплитудных ЦПУ следящего типа.
2. Разработка структур ЦПУ с новыми корректирующими алгоритмами, обеспечивающими повышенную точность преобразования в код выходных сигналов ДУ с идеальными и неидеальными синусно-косинусными выходными зависимостями.

3. Проведение классификации известных и разработанных в данной работе структур амплитудных ЦПУ следящего типа.

4. Поиск научно-технических решений, позволяющих формировать и использовать сигнал, характеризующий с высокой точностью, без применения угломерных устройств, текущую погрешность преобразования угла в код, получивший в работе наименование «сигнал контроля погрешности преобразования» (сигнал КПП).

5. Разработка обобщённой математической модели, позволяющей с малыми временными затратами выбрать вариант исполнения ЦПУ (из сотен возможных), отвечающий заданным требованиям, и методики проектирования ЦПУ.

6. Проведение экспериментов для подтверждения теоретических положений.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертационной работы использовались методы: синтеза систем автоматического регулирования, приближенного гармонического анализа, математического моделирования и экспериментального исследования.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Предложены структуры корректируемых ЦПУ, отличающиеся тем, что в них осуществляется одновременный учёт неидеальности ДУ и АЦПДУ. Это повышает эффективность используемых корректирующих алгоритмов. Отличительной чертой предлагаемых структур является не только формирование точного значения выходного кода, но и формирование точного сигнала скорости, несмотря на наличие неидеальных характеристик ДУ и АЦПДУ.

2. Предложена классификация известных и новых вариантов построения ЦПУ, которая позволила наметить дальнейшие пути повышения точности ЦПУ.

3. Предложен алгоритм формирования и использования сигнала, характеризующего с повышенной точностью, без применения угломерных устройств текущую погрешность преобразования ЦПУ.

4. Разработана обобщённая математическая модель, позволяющая с малыми временными затратами выбрать структуру ЦПУ желаемой точности при минимизации аппаратных средств.

5. Разработана методика проектирования ЦПУ.

Практическая ценность работы.

Применение научно-технических результатов данной диссертационной работы обеспечивает возможность замещения отечественными преобразователями зарубежных ЦПУ, которые в настоящее время используются в качестве датчиков обратной связи, во вновь создаваемых в России ЦСУ.

Использование предложенной методики проектирования позволяет сократить время на разработку ЦПУ требуемой точности.

Применение разработанных алгоритмов обеспечивает высокую точность преобразования при использовании дешевых ДУ низких классов точности как в одноотсчетных, так и в двухотсчетных вариантах исполнения.

Формирование точного сигнала скорости позволяет отказаться от использования тахогенераторов.

Использование сигнала КПП позволяет сократить временные затраты при проведении контроля метрологических характеристик ЦПУ в процессе производства, а также повысить качество выпускаемой продукции с учетом расширенного объема прямых испытаний, а в процессе эксплуатации - поддерживать точность преобразования на заданном уровне, несмотря на воздействие неблагоприятных факторов.

Апробация работы и публикации.

Корректность и значимость результатов исследования подтверждена актом об использовании материалов диссертации при выполнении НИР «Многофункциональные амплитудные цифровые преобразователи угла (ЦПУ) следящего типа» (головное предприятие – ОАО «ЦНИИАГ»).

Результаты диссертации использованы также при разработке амплитудно-го ЦПУ следящего типа для модернизации телескопов изделия 30Ж6М. Это позволило увеличить точность ЦПУ с 20 до 22 разрядов.

По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе две статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и два патента на изобретения.

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: 28-ой конференции молодых учёных и специалистов ОАО «ЦНИИАГ» Михайловские чтения, г. Москва, 2013 г.; V Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов Будущее машиностроения России, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2012 г.; X научно-практической конференции молодых специалистов и студентов памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова, НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова, г. Москва, 2012 г.; общеуниверситетской научно-технической конференции Студенческая научная весна, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2010 г.; научно-технических семинарах в НИИ Специального машиностроения, на кафедре «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Баумана в 2010-2013 гг., г. Москва, а также в процессе активного участия в выставках «Архимед», «Высокие технологии XXI века», «Изделия и технологии двойного назначения», отмеченного получением медалей различного достоинства.

На Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» получен диплом за «Лучшую научную работу».

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Библиографический список содержит 90 ссылок. Объём диссертации составляет 132 страницы. Работа содержит 53 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, обозначаются цель и задачи исследования, приводится краткий обзор исследований по теме диссертации. Отмечаются научная новизна и практическая значимость работы, излагаются сведения об апробации и публикациях.

В первой главе представлены анализ построения и классификация известных и найденных в процессе исследования вариантов амплитудных ЦПУ. Указанная классификация (в упрощенной для автореферата форме) изображена на рисунке 1.

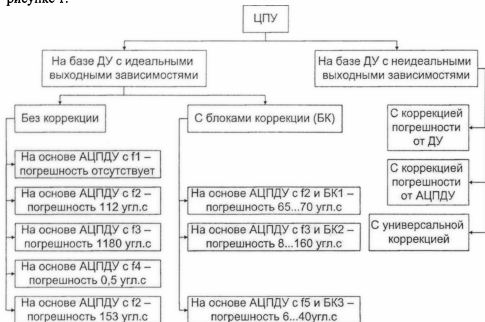


Рисунок 1. Классификация амплитудных ЦПУ следящего типа

Согласно предложенной классификации амплитудные ЦПУ разделены на две группы. В одну из них входят ЦПУ, построенные на базе ДУ типа ВТ, с идеальными синусно-косинусными выходными зависимостями, а в другую – на базе ДУ типа ВТ с неидеальными выходными сигналами. В свою очередь, первая группа включает в себя некорректируемые и корректируемые ЦПУ. Применяемые в них АЦПДУ содержат функциональные цифро-аналоговые преобразователи (ФЦАП) с различными коэффициентами передачи. Это могут быть точные синусно-косинусные функции, либо аппроксимирующие функции (см. таблицу 1). Базовые функции $f_1(x) \dots f_5(x)$ описывают закон изменения координаты в первой четверти, который позволяет перейти к продолженным функциям в рамках электрического периода. При этом выполняется условие $0 \leq x < 1$ при изменении угла α в пределах первой четверти. Функционирование в остальных квадрантах обеспечивается селекторами квадрантов. Разработанные

блоки коррекции (БК) позволяют снизить погрешность, вносимую использованием аппроксимирующих функций.

Таблица 1

Коэффициенты передачи ФЦАП для ЦПУ на базе ДУ с идеальными синусно-косинусными выходными зависимостями

Коэффициенты передачи для ФЦАП2	Коэффициенты передачи для ФЦАП1	Погрешность некорректируемого ЦПУ	Погрешность корректируемого ЦПУ
$f_1(x) = \sin 0,5\pi x$	$f_1(1-x) = \cos 0,5\pi x$	0	–
$f_2(x) = (1+\kappa)x/(1+\kappa x)$, где $\kappa=0,5551$	$f_2(1-x) = (1+\kappa)(1-x)/[1+\kappa(1-x)]$, где $\kappa=0,5551$	112 угл.с	65...70 угл.с
$f_3(x) = (1+\kappa)x/(1+\kappa x)$, где $\kappa=0,6052$	$f_3(1-x) = (1+\kappa)(1-x)/[1+\kappa(1-x)]$, где $\kappa=0,6052$	1180 угл.с	8...160 угл.с
$f_4(x) = (1+\kappa_1+\kappa_2)x/(1+\kappa_1x+\kappa_2x^2)$, где $\kappa_1=0,74797614$, $\kappa_2 = \text{минус } 0,1773207$	$f_4(1-x) = (1+\kappa_1+\kappa_2)(1-x)/[1+\kappa_1(1-x)+\kappa_2(1-x)^2]$, где $\kappa_1=0,74797614$, $\kappa_2 = \text{минус } 0,1773207$	0,5 угл.с	–
$f_5(x) = (1+\kappa)x/(1+\kappa x)$, где $\kappa=0,5522$	$f_5(1-x) = (1+\kappa)(1-x)/[1+\kappa(1-x)]$, где $\kappa=0,5522$	153 угл.с	6...40 угл.с

Вторая группа ЦПУ – на базе ДУ типа ВТ с неидеальными выходными характеристиками – представлена в классификации шестью основными вариантами исполнения, все – с коррекцией. Первые три относятся к категории известных построений: ЦПУ с коррекцией погрешности преобразования по результатам предварительных статических измерений; ЦПУ с коррекцией по результатам гармонического анализа выходных зависимостей ДУ; ЦПУ с коррекцией по результатам обработки кодов, сформированных из сигналов сдвоенных ДУ с различными коэффициентами электрической редукции. Три последующих

варианта были синтезированы в результате проведенного анализа достоинств и недостатков вышеуказанных построений в процессе данного исследования. Это ЦПУ с коррекцией отдельных составляющих погрешности преобразования, ЦПУ с коррекцией полной погрешности преобразования цифровым и цифроаналоговым путём с использованием сигнала контроля погрешности преобразования. После этого представленные варианты были объединены в группы, по виду коррекции: ЦПУ с коррекцией погрешности от ДУ, ЦПУ с коррекцией погрешности от АЦПДУ, ЦПУ с универсальной коррекцией.

Во второй главе представлены различные структуры построения амплитудных ЦПУ следящего типа с астатизмом второго порядка.

Рассмотрены ЦПУ, базирующиеся на использовании ДУ типа ВТ, с идеальными синусно-косинусными выходными зависимостями, и различных АЦПДУ. Проблема заключается в том, что АЦПДУ с ФЦАП, содержащими синусно-косинусные ПЗУ, не обеспечивают требуемого быстродействия, а известные АЦПДУ с ФЦАП, коэффициенты передачи которых описываются дробно-рациональными функциями, не обеспечивают требуемой точности преобразования угла в код.

В большинстве таких ЦПУ преобразование углового положения α ротора ВТ в двоичный код N в пределах электрического периода ДУ описывается соотношением вида $\sin \alpha \cdot F_C(N) - \cos \alpha \cdot F_S(N) = 0$, где коэффициенты передачи ФЦАП соответствуют зависимостям вида $F_C(N) \approx \cos 2\pi N$ и $F_S(N) \approx \sin 2\pi N$. Переход от ЦПУ со сложно реализуемыми ФЦАП с синусно-косинусными коэффициентами передачи к преобразователям с ФЦАП, коэффициенты передачи которых описываются аппроксимирующими дробно-рациональными функциями приводит к появлению методической погрешности преобразования той или иной величины и формы. Указанные функции представляют собой продолженные периодические функции с базовыми функциями $f_s(x)$ и $f_c(x)$, которые характеризуют изменение координаты в пределах первого квадранта. Отличительной чертой выполненного поиска является отказ от исследования соотношения вида $f_s(x) / f_c(x)$ и переход к гармоническому анализу продолженных периодических функций. Для снижения погрешности преобразования предложены различные блоки коррекции. Их действие основано на анализе гармонического состава продолженных функций и компенсации доминирующих в погрешности гармоник. Результаты использования блоков коррекции также представлены в таблице 1.

Установлено, что гармонический состав продолженной функции с известной базовой функцией вида $f_2(x) = 1,5551x / (1 + 0,5551x)$ характеризуется наличием парных нечетных гармоник противоположного знака: 3 и 5, 7 и 9, 11 и 13 и т.д. При этом абсолютные величины амплитудных значений 3 и 5 гармоник имеют равное значение, а абсолютные амплитудные значения остальных пар близки в той или иной степени. Приведенные результаты гармонического анализа объясняют известный вид соответствующей методической погрешности преобразования ($\approx \sin 8\alpha$). В работе предложены алгоритмы нейтрализации негативного влияния взаимно не скомпенсированных пар гармоник на конечное

значение методической погрешности преобразования такого вида. Эффективность такой коррекции, из-за значительного числа возмущающих парных гармоник, невысока. Она обеспечивает только двукратное повышение конечной точности преобразования.

Гармонический анализ базовой функции вида $f_3(x)=1,6052x/(1+0,6052x)$ обратил на себя внимание тем, что в этом случае обеспечивается равенство абсолютных значений 7 и 9 гармоник и повышается степень сближения амплитуд остальных парных гармоник. При этом начальная методическая погрешность преобразования угла в код характеризуется пространственной гармоникой вида $\sin 4\alpha$ с амплитудным значением ≈ 20 угл. м. Целесообразность использования такого построения объясняется тем, что в случае компенсации такой одиночной гармоники обеспечивается повышенная точность преобразования угла в код. Максимальное значение конечной методической погрешности преобразования снижается до значения ≈ 9 угл.с, т.е. эффективность нейтрализации составляет величину порядка 130 раз.

Также был проведен гармонический анализ базовой функции вида $f_4(x)=(1,5707x)/(1+0,74797616x-0,1773207x^2)$, который показал целесообразность использования ее для точного преобразования угла в код. Анализ показал, что в таком разложении присутствуют парные функции с противоположными знаками, и при этом обеспечивается точное равенство амплитудных значений 3 и 5, а также 7 и 9 пространственных гармоник, а у парных гармоник более высокого порядка наблюдается сближение абсолютных значений. В соответствующем ЦПУ обеспечивается начальная методическая погрешность преобразования с максимальным значением $\approx 0,5$ угл.с. Очевидно, что применение БК в такой структуре не целесообразно.

И, наконец, в диссертационной работе синтезирована еще одна структура корректируемого ЦПУ с базовой функцией $f_5(x)=1,552313x/(1+0,552313x)$, которая при начальной методической погрешности преобразования угла в код в 150 угл.с. обеспечивает получение конечной методической погрешности с максимальным значением ≈ 2 угл.с. Такой результат вызван тем, что при указанном коэффициенте функциональности выполняется условие точного преобразования угла в код для угловых положений, кратных 22,5 электрическим градусам, а для точного преобразования в остальных угловых положениях используется определенный вариант исполнения БК.

В этой же главе рассмотрены возможные варианты построения БК и формирователей их входных напряжений. Представленные варианты способствуют выбору структуры построения ЦПУ в целом с минимальным объемом используемого оборудования и заданной конечной точностью преобразования. Область применения данных решений в основном соответствует построению точных одноотсчетных ЦПУ на базе точных ДУ типа ВТ.

Далее представлены структуры амплитудных ЦПУ следящего типа с астатизмом второго порядка, обеспечивающие высокую точность преобразования при использовании ДУ с неидеальными выходными зависимостями и различ-

ных АЦПДУ. Двухфазные выходные сигналы таких датчиков характеризуются, в основном, следующими особенностями:

- отличием максимальных амплитудных значений выходных напряжений переменного тока;
- нарушением ортогональности (взаимный сдвиг выходных сигналов по углу отличен от значения 90 электрических градусов);
- наличием значимых по величине нечетных пространственных гармоник (с 3 по 17 включительно).

Основная область их применения – построение каналов точного отсчета (ТО) двухотсчетных ЦПУ, но данные технические решения могут использоваться и для построения одноотсчетных ЦПУ с повышенной точностью преобразования угла в код. Известно, что выходные сигналы ДУТО изменяются в некоторой степени при переходе от образца к образцу за счет несовершенства используемой технологии их изготовления. В настоящее время производственный разброс выходных характеристик зарубежных и отечественных ДУТО даже при коэффициентах электрической редукиции 64 (128) и точных синусно-косинусных АЦПВТ приводит к появлению погрешности преобразования на уровне 5...10 угл. с. Известные технические решения в области создания корректируемых ЦПУ с указанными ДУТО не приводят к существенному повышению конечной точности преобразования угла в код.

Из известных корректируемых ЦПУ обращает на себя внимание структура с основным и вспомогательным каналами точного отсчета, сравнительный анализ выходных кодов которых обеспечивает, в подготовительном режиме, выработку массива кодов коррекции. Суммирование, в штатном режиме преобразования, текущих значений начального выходного кода основного канала и сохраняемого массива кодов коррекции формирует конечное значение выходного кода такого ЦПУ. Несмотря на 2-кратное увеличение объема используемого оборудования, применение специального двоечного ДУТО (ДУТО основного канала и ДУТО вспомогательного канала с различающимися коэффициентами электрической редукиции), эффективность коррекции невысока.

Предлагаются три вида корректируемых ЦПУ:

- ЦПУ с блоком коррекции вида 1, вырабатывающим цифроаналоговым способом отдельные гармонические составляющие общего корректирующего напряжения, вводимые во внутреннюю цепь сигнала рассогласования текущих значений угла и кода ЦПУ;
- ЦПУ с блоком коррекции вида 2, вырабатывающим цифроаналоговым способом корректирующее напряжение в виде кривой общего вида, также вводимое в цепь сигнала рассогласования;
- ЦПУ с блоком коррекции вида 3, долговременно сохраняющим предварительно сформированный массив составляющих кода коррекции, и внешним цифровым сумматором начального выходного кода ЦПУ и соответствующих составляющих массива кодов коррекции.

Разработанные ЦПУ универсальны, так как способны нейтрализовать негативное влияние возможной неидеальности характеристик ДУ и АЦПДУ на

конечную точность преобразования угла в код – как вместе, так и по отдельности. Особенность некоторых из предлагаемых ЦПУ заключается в выработке (в специальном предварительном режиме) информационного сигнала нового вида, точно характеризующего в аналоговой или цифровой форме текущую погрешность преобразования угла в код в пределах электрического периода ДУ. Достоверность указанного сигнала теоретически обоснована и подтверждена соответствующим математическим моделированием и испытаниями макетных образцов ЦПУ, которые представлены в последующих главах.

Предлагаемый ЦПУ с блоком коррекции вида 1 базируется на использовании теоретических положений гармонического анализа периодических кривых общего вида и на знании процессов, протекающих в цепях амплитудного ЦПУ следящего типа с астатизмом второго порядка в статическом и динамическом режимах. Ранее указывалось, что неидеальность характеристик ДУ (АЦПДУ) вызывает появление погрешности преобразования, характер изменения которой в пределах электрического периода характеризуется кривой общего вида. Эту кривую можно представить в виде набора гармонических составляющих. Очевидно, что введение в цепь рассогласования дополнительного (корректирующего) напряжения, тождественного любой указанной гармонической составляющей, дает положительный эффект в виде соответствующего повышения конечной точности преобразования. В диссертационной работе доказано, что использование конкретного набора корректирующих напряжений с ограниченным числом гармоник обеспечивает повышение точности преобразования до требуемого уровня. Дополнительной особенностью построения ЦПУ с блоком коррекции вида 1 является выработка двух наборов корректирующих напряжений. Первый, нерегулируемый, используется для нейтрализации среднестатистической неидеальности ДУ и АЦПДУ (при ее наличии), а второй, регулируемый, должен нейтрализовать негативное влияние производственного разброса выходных характеристик ВТ. Использование второго набора может также обеспечивать поддержание точности преобразования на требуемом уровне, несмотря на негативное воздействие эксплуатационных факторов, включая эффект старения. В диссертационной работе рассмотрены возможные варианты построения формирователей соответствующих корректирующих напряжений и представлены методики проведения указанных регулировочных операций. Также показано, что повышение конечной точности преобразования путем использования предложенного алгоритма автоматически приводит к повышению качества дополнительно формируемого сигнала скорости. Построение ЦПУ с двумя наборами корректирующих напряжений направлено на снижение инструментальной составляющей погрешности преобразования.

Отличительной особенностью предлагаемого ЦПУ с блоком коррекции вида 2 является формирование двух корректирующих напряжений общего вида и использование их в виде дополнительных составляющих напряжения рассогласования. Первое корректирующее напряжение формируется путем цифроаналогового преобразования, однократно формируемого и долговременно сохраняемого, точного массива кодов коррекции, использование которого обес-

печивает нейтрализацию среднестатистической неидеальности характеристик ДУ и АЦПДУ (при ее наличии). Второе напряжение также формируется путем цифроаналогового преобразования массива кодов коррекции, но второй массив может формироваться неоднократно и использоваться в случаях превышения текущей погрешностью преобразования допустимого уровня. В диссертационной работе представлены возможные способы формирования требуемых корректирующих напряжений и соответствующие структуры реализации. В данном ЦПУ, также как и в предыдущем варианте исполнения, обеспечивается повышенное качество сформированного сигнала скорости и снижение инструментальной погрешности преобразования.

Третья предлагаемая структура корректируемого ЦПУ принципиально отличается от ранее рассмотренных тем, что требуемая корректировка кода осуществляется цифровым образом, вне контура следящего ЦПУ. При использовании этой структуры формируется в специальных предварительных режимах два массива кодов коррекции (постоянный и изменяемый) и передаются на долговременное хранение, адресно, с опорой на текущее значение начального (неоткорректированного) кода угла. В штатном режиме преобразования внешний цифровой сумматор суммирует три кода: текущие значения начального кода угла, соответствующие составляющие первого сохранённого массива кодов коррекции и соответствующие составляющие второго сохраняемого массива кодов коррекции.

В диссертационной работе приведены результаты, подтверждающие высокую эффективность предлагаемых алгоритмов коррекции и, соответственно, получение точных значений конечного кода угла. Получение высоких показателей в значительной мере определяется точностью формирования массивов кодов коррекции и корректирующего напряжения, которая для второй и третьей предложенных структур связана с использованием специального информационного сигнала, обозначенного в работе как сигнал контроля погрешности преобразования.

Из теории построения амплитудных ЦПУ следящего типа с астатизмом второго порядка следует, что при равномерной угловой скорости вращения ротора ДУ переменная составляющая выходного тахометрического сигнала АЦПДУ косвенно (то есть требует дополнительной обработки) характеризует погрешность преобразования угла в код. Как уже отмечалось, появление указанной погрешности связано с неидеальностью характеристик ДУ и АЦПДУ, которые можно рассматривать как внешнее возмущение следящей системы. При выполнении диссертационной работы были определены: допустимые значения указанной угловой скорости, требуемая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ЦПУ как следящей системы и алгоритм преобразования переменной составляющей указанного тахометрического сигнала в сигнал, точно характеризующий текущую погрешность. Сформированный сигнал в аналоговом виде может фиксироваться запоминающим осциллографом, а при последующем аналого-цифровом преобразовании может сохраняться в виде массива кодов с опорой на соответствующие значения выходного кода.

Предлагается следующий алгоритм формирования сигнала КПП:

- обеспечить вращение ротора ДУ с заданной постоянной угловой скоростью на время прохождения двух-трех электрических периодов ДУ или задать импульс начального вращения и условия последующего вращения с предельно малым коэффициентом затухания (для выполнения указанных условий может быть применена дополнительная инерционная масса);
- выделить переменную составляющую выходного тахометрического сигнала АЦПДУ;
- выполнить интегрирование выделенного сигнала и его фиксацию для последующего использования в качестве информационного или корректирующего.

Первичное назначение сигнала КПП заключалось в оценке текущей погрешности преобразования амплитудных ЦПУ следящего типа с астатизмом второго порядка. Исследования диссертационной работы в части повышения качества формирования сигнала КПП позволили дополнительно использовать этот сигнал для создания корректируемых ЦПУ с повышенной конечной точностью преобразования. Достижение требуемого повышенного качества указанного сигнала подтверждено математическим моделированием и испытаниями макетных образцов ЦПУ.

Третья глава посвящена математической модели и методике проектирования ЦПУ. Представленное в классификаторе многообразие построений ЦПУ, необходимость оценки объема используемого при реализации оборудования, а также количественной оценки возможной достижимой точности преобразования потребовали создания обобщенной математической модели, которая представлена на рисунке 2.

В основу построения обобщенной модели положены следующие функциональные устройства:

- ДУ (DU);
- АЦПДУ (Convertor 1);
- формирователь сигнала Uk1, корректирующего составляющую погрешности преобразования от неидеальности характеристик АЦПДУ (FormUk1);
- формирователь сигнала Uk2, корректирующего составляющую погрешности преобразования от неидеальности характеристик ДУ (FormUk2);
- формирователь универсального корректирующего сигнала Uk3, базирующегося на использовании сигнала КПП, в состав которого, в свою очередь, входят: Convertor 2, идентичный Convertor 1, и два интегрирующих устройства Tint 1, Tint 2.
- формирователь базовых напряжений для FormUk1, FormUk2 и Form garm (FormUB).

Внутреннюю структуру этих блоков модели можно менять путём изменения соответствующих кодов, которые выбирает оператор при исследовании

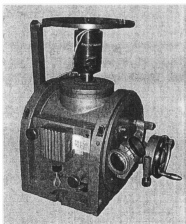
ЦПУ того или иного вида. Код *upr.DU* управляет степенью искажённости характеристик виртуального ДУ, код *upr.F* определяет вид коэффициентов передачи ФЦАП АЦПДУ, коды *upr.UB*, *upr.f*, *upr.Uk2* определяют вид входного напряжения формирователей корректирующих напряжений, коды *upr.Tint1*, *upr.Tint2* позволяют выбирать значение постоянной времени интегрирования при формировании сигнала КПП.

Описанное построение позволяет исследовать точностные возможности всех рассматриваемых в работе структур ЦПУ. Кроме того, данная модель имеет открытую архитектуру, что позволяет, добавляя новые блоки, на её базе исследовать характеристики новых ЦПУ. При этом с помощью модели возможно определять не только статическую погрешность преобразования, но и исследовать динамические характеристики ЦПУ как следящей системы автоматического регулирования с астатизмом второго порядка.

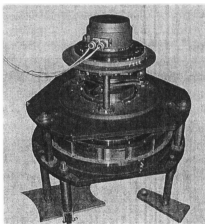
В этой же главе представлены результаты исследования точности преобразования ряда структур ЦПУ.

На использовании представленной математической модели базируется методика проектирования амплитудных ЦПУ следящего типа, подробно рассмотренная в диссертационной работе.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований макетных образцов одноотсчётного 16-разрядного и двухотсчётного 22-разрядного ЦПУ, изготовленных в процессе выполнения диссертационной работы.



а



б

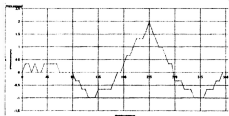
Рисунок 3. Измерительные устройства для экспериментальных исследований одноотсчётного (рис.3а) и двухотсчётного (рис.3б) ЦПУ

Измерения проводились в статическом режиме с использованием угломерных устройств и в динамическом режиме, когда оценка погрешности преобразования проводилась путем фиксации сигнала КПП. В качестве угломерного

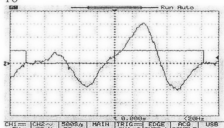
устройства при испытаниях 16-разрядного ЦПУ использовалась серийная оптическая делительная головка ОДГ-5, а при испытаниях 22-разрядного ЦПУ – специальный оптический ДУТО с коэффициентом электрической редукции 4096. Предварительно установлено, что построение оптического ДУТО обеспечивает угловую точность размещения нулевых положений всех электрических периодов на уровне порядка 0,1 угл.с., которые можно использовать в качестве задаваемых контрольных углов при контроле погрешности ЦПУ в статическом режиме. Внешний вид созданных измерительных устройств представлен на рисунке 3.

На рисунке 4 представлены результаты измерения погрешности преобразования одноотсчётного и двухотсчётного ЦПУ (ЦПУ-16 и ЦПУ-22 соответственно), полученные в статическом и динамическом режимах. По графикам видно, что сигнал контроля погрешности очень близок по величине и форме статической погрешности. Таким образом, сигнал КПП, получаемый в динамическом режиме, с необходимой достоверностью отображает текущую погрешность преобразования ЦПУ, измеряемую в статическом режиме, что обеспечивает возможность использования сигнала КПП в качестве корректирующего.

ЦПУ - 16

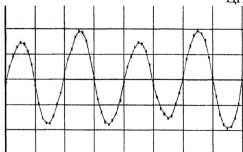


Погрешность преобразования,
измеренная в статическом режиме

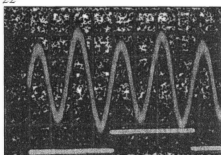


Сигнал контроля
погрешности преобразования

ЦПУ - 22



Погрешность преобразования,
измеренная в статическом режиме



Сигнал контроля
погрешности преобразования

Рисунок 4. Результаты измерений погрешности преобразования

По совокупности проведённых экспериментов можно сделать вывод о правомочности теоретических положений, изложенных в диссертации, и адекватности разработанной математической модели.

В заключении диссертационной работы приводятся общие выводы по результатам проведённых исследований.

Основные выводы. В процессе выполнения теоретических и экспериментальных исследований автором диссертационной работы получены следующие основные научно-технические результаты:

1. Разработаны и апробированы новые алгоритмы преобразования, обеспечивающие создание ЦПУ широкого класса точности, удовлетворяющих требованиям современных ЦСУ. Предложенные структуры корректируемых ЦПУ отличаются тем, что в них осуществляется одновременный учёт неидеальности ДУ и АЦПДУ. Это повышает эффективность используемых корректирующих алгоритмов. Отличительной чертой предлагаемых структур является не только формирование точного значения выходного кода, но и формирование точного сигнала скорости, несмотря на наличие неидеальных характеристик ДУ и АЦПДУ.

2. Предложена классификация известных и новых вариантов построения ЦПУ, которая позволила наметить дальнейшие пути повышения точности ЦПУ. Классификация построения ЦПУ, а также соответствующая обобщенная математическая модель, способствуют развитию направления техники «Системный анализ, управление и обработка информации». Данные научно-технические результаты также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов в области «Машиностроение, система приводов и деталей машин».

3. Проведен анализ и выработаны алгоритмы формирования и использования информационного сигнала, характеризующего с высокой точностью, без применения угломерных устройств, текущую погрешность преобразования угла в код. Использование указанного сигнала при производстве повышает качество выпускаемой продукции, а при эксплуатации - позволяет с малыми временными затратами и без использования дополнительных технических средств поддерживать точность преобразования на заданном уровне.

4. Построена математическая модель, которая позволяет оценить достижимую точность преобразования и объём используемого при реализации оборудования. С помощью модели возможно определять не только статическую погрешность преобразования, но и исследовать динамические характеристики ЦПУ как следящей системы автоматического регулирования с астатизмом второго порядка.

5. Предложенные в работе методики измерения текущей погрешности преобразования угла в код и варианты построения соответствующего стендового оборудования, позволяют испытывать в автоматическом режиме точные одноотсчетные и двухотсчетные ЦПУ (максимальное значение погрешности преобразования одноотсчетного ЦПУ может соответствовать уровню порядка одной угловой минуты, а двухотсчетного – до долей угловых секунд). При этом

обеспечивается повышение качества измерений и сокращение материальных расходов на испытания.

6. Разработанная методика проектирования амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа позволяет существенно сократить время на создание ЦПУ с заданными параметрами.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Бошляков А.А., Домрачев В.М., Ипполитова Е.В. Обобщённая математическая модель амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. Специальный выпуск Специальная робототехника и мехатроника. С. 87-94.

2. Домрачев В.М., Ипполитова Е.В. Двухотсчётные амплитудные цифровые преобразователи угла на базе гибридных микросборок серии 2602 // Измерительная техника. 2011. №11. С. 16-19.

3. Ипполитова Е.В. Структуры цифровых преобразователей угла повышенной точности // Будущее машиностроения России: Сборник тезисов докладов всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2012. С. 251-252.

4. Патент – 2435296 РФ, МПК H03M 1/48 (2006.01). Цифровой преобразователь угла / В.М. Домрачев, Е.В. Ипполитова. ФГУП «ЦНИИАГ».- № 2010143300/08. Заявл. 25.10.2010 // Б.И. 2011. №33.

5. Патент – 2488958 РФ, МПК H03M 1/18 (2006.01). Способ цифрового преобразования угла / Н.В. Буторин, Н.Н. Воронин, В.М. Домрачев, Е.В. Ипполитова. ОАО «ЦНИИАГ».- № 2012124529/08. Заявл. 14.06.2012 // Б.И. 2013. №21.

6. Ипполитова Е.В. Повышение точности и расширение функциональности цифровых преобразователей угла // Молодежный научно-технический вестник. 2013. №3. Электронный журнал.

7. Ипполитова Е.В. Разработка высокоточных амплитудных цифровых преобразователей угла следящего типа на базе обобщённой математической модели // Студенческий научный вестник: Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции Студенческая научная весна-2010. М., 2010. Том X, часть 2. С. 278.