На правах рукописи

ТЯПКИН МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННОГО ПЛАНАРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированного электропривода» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, с.н.с
Балковой Александр Петрович

Официальные оппоненты: заведующий кафедры ФН7 «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Баумана, доктор технических наук, профессор
Красовский Александр Борисович

доцент кафедры «Автоматических систем» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики», кандидат технических наук, доцент
Лузинский Виктор Тимофеевич

Ведущее предприятие: ОАО "СКБ ИС", г. Санкт-Петербург

Защита состоится «7» июня 2013 года в аудитории М611 в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 13.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « 6 » мая 2013 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.157.02
к.т.н., доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В современной полупроводниковой промышленности наблюдается устойчивая тенденция миниатюризации компонентов. В связи с этим на многих стадиях производства, например, интегральных компонентов и полупроводниковых пластин, монтажа печатных плат, лазерной обработки, электронно-лучевой литографии и тестирования требуется решить задачу повышения точности и производительности технологического оборудования.

Точность работы и производительность такого оборудования во многом определяется координатной системой движения. Система движения должна обладать высокой точностью и быстродействием, иметь возможность длительной непрерывной работы с минимальным количеством отказов.

Прецизионный планарный электропривод на базе планарного линейного шагового двигателя (ПЛШД) нашел широкое применение в прецизионных координатных системах благодаря свойствам параллельной кинематики, т.е. высокой скорости, высокой точности движения в двух координатах (*XY*) при одной подвижной части. На одной рабочей поверхности могут размещаться несколько ПЛШД, кроме того, ПЛШД может применяться в положении якоря над и под статорами, что значительно увеличивает эффективность использования пространства и производительность оборудования. Отсутствие механического трения и износа магнито-воздушной опоры в ПЛШД обеспечивают длительный срок службы. Важную роль в широком распространении планарного линейного шагового двигателя играет его низкая стоимость.

Низкий ценовой сегмент рынка занимает планарный электропривод с датчиками положения на элементах Холла, при этом точность электропривода не лучше ±10 мкм. Рост требований к координатным системам движения ставит задачу обеспечения точности не хуже ±3 мкм. Система измерения положения на элементах Холла не обеспечивает требуемую точность, что связано с влияние магнитного поля двигателя и намагниченности статора на точность этих датчиков.

Использование в качестве измерительной системы лазерных интерферометров или оптических двухкоординатных энкодеров позволяет увеличить точность планарного электропривода до ±1 мкм, но приводит к значительному увеличению его стоимости.

В связи с этим разработка прецизионного планарного электропривода, значительно превосходящего по точности мировые аналоги, без существенного увеличения стоимости электропривода, является актуальной задачей.

Целью работы является исследование и разработка прецизионного планарного электропривода на базе планарного линейного шагового

двигателя, значительно превосходящего по точности мировые аналоги в низком ценовом сегменте.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. исследованы способы увеличения точности планарного электропривода при сохранении его стоимости;
2. разработана высокоточная система измерения положения;
3. разработаны методики аттестации статической и динамической точности планарного электропривода;
4. разработаны методики калибровки планарного электропривода;
5. практически реализованы и исследованы система измерения положения и методы калибровки на экспериментальном планарном электроприводе.

Основные методы научных исследований. Исследования, проведенные в диссертационной работе, базируются на использовании теории электропривода, теории электрических цепей, теории электрических машин, теории автоматического управления, методов цифровой обработки сигналов, методов математического моделирования систем с использованием пакетов Matlab, Mathcad, методов интерактивной отладки микропроцессорных систем с использованием среды разработки Code Composer Studio, методов моделирования с использованием программы ELCUT.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Обоснован выбор емкостной системы измерения положения и калибровки планарного электропривода для увеличения точности без существенного увеличения стоимости комплектного электропривода.
2. Разработана система измерения положения по трем осям (X, Y, φ) на базе емкостного датчика положения и цифрового интерполятора, интегрированная в якорь серийного ПЛШД.
3. Разработан комплекс методов цифровой обработки и автоматического повышения точности синусно-косинусных датчиков положения с амплитудной модуляцией сигналов.
4. Разработан метод аттестации точности планарного электропривода с помощью эталонных датчиков положения (лазерных интерферометров).
5. Разработан метод исключения погрешности измерения положения планарного электропривода.
6. Разработан метод калибровки планарного электропривода посредством малоразмерной таблицы, содержащей одномерную короткопериодную и двумерную длиннопериодную таблицы. Разработан метод построения калибровочных таблиц.
7. Проведен комплексный анализ мер по повышению траекторной точности планарного электропривода на базе ПЛШД. Предложена

модернизация существующей системы управления планарного электропривода для повышения траекторной точности.

Практическая ценность работы и ее реализация состоят в том, что разработанные методы и устройства использованы при разработке прототипа прецизионного планарного электропривода, который превосходит по точности и повторяемости мировые аналоги в низком ценовом сегменте. Разработанные методы цифровой обработки и автоматического повышения точности могут быть использованы для любых синусно-косинусных датчиков положения с амплитудной модуляцией сигналов. Разработанные методы аттестации точности и исключения погрешности измерения могут быть использованы для аттестации многокоординатных электроприводов, обеспечивающих перемещение в плоскости *XY*.

Достоверность результатов научных положений и выводов подтверждена экспериментальными исследованиями разработанного прототипа прецизионного планарного электропривода с интегрированной емкостной системой измерения положения с использованием методов цифровой обработки сигналов и методов математического моделирования. Достоверность результатов калибровки и аттестации точности подтверждается методами измерения, согласно стандартам ИСО 230, с помощью сертифицированного оборудования (лазерных интерферометров). Расчетные эксперименты проводились в среде программных комплексов Matlab, Mathcad, ELCUT.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в практику проектирования планарных электроприводов компании «HIWIN» (Тайвань).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование емкостной системы измерения положения и калибровки планарного электропривода для увеличения точности при сохранении стоимости.
2. Алгоритм обработки сигналов и автоматического повышения точности синусно-косинусных датчиков положения.
3. Методика аттестации точности планарного электропривода с помощью лазерных интерферометров, согласованная со стандартами ИСО 230.
4. Алгоритм исключения погрешности измерения планарного электропривода с помощью аттестационного стенда.
5. Алгоритм калибровки планарного электропривода с разбиением двумерной калибровочной таблицы на одномерную короткопериодную и двумерную длиннопериодную таблицы, и метод построения калибровочных таблиц.
6. Методика увеличения траекторной точности прецизионного планарного электропривода.

Апробация. Основные положения диссертации, ее отдельные решения и результаты докладывались и обсуждались на ряде конференций, в том

числе: XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2011), XVIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2012), XLII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи «Федоровские Чтения 2012» (Москва, 2012), VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу (Иваново, 2012), XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013), заседаниях кафедры «Автоматизированного электропривода» НИУ «МЭИ».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 7 печатных работ, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 166 страницах, включая 10 таблиц и 112 иллюстраций. Список использованной литературы включает 73 наименования. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено описание объекта исследований – прецизионного планарного электропривода на базе ПЛШД, основные области применения электропривода и требования, которые предъявляются к современным прецизионным планарным электроприводам. Обоснована актуальность исследования и разработки способов увеличения точности планарного электропривода без существенного увеличения цены комплектного электропривода. Сформулированы цели и задачи диссертации.

В **первой главе** исследуются способы увеличения точности планарного электропривода. Решение задачи увеличения точности планарного электропривода требует комплексного анализа ПЛШД, системы управления и измерения положения. В качестве исследуемого прототипа прецизионного планарного электропривода использован серийный планарный электропривод в низком ценовом сегменте с датчиками положения на элементах Холла.

Основные элементы прецизионного планарного электропривода: ПЛШД, система измерения положения, управляющее устройство (контроллер), управляющее устройство верхнего уровня, система обеспечения подачи сжатого воздуха.

ПЛШД включает подвижный якорь и неподвижный статор. Статор ПЛШД представляет собой пассивную поверхность из магнито-мягкого материала с двухмерным массивом зубцов, пространство между которыми заполнено эпоксидной смолой. Якорь ПЛШД содержит четыре двухфазных линейных шаговых двигателя (ЛШД) ($X1$, $X2$ и $Y1$, $Y2$), размещенных

симметрично относительно его центра масс. Осевые двигатели $X1$ и $X2$ обеспечивают перемещения по оси X, осевые двигатели $Y1$, $Y2$ – перемещения по оси Y. Компенсация разворачивающих сил (по оси φ) обеспечивается за счет раздельного управления осевыми двигателями. Якорь двигателя оснащен магнито-воздушными опорами, что обеспечивает малый рабочий зазор (8-12 мкм), устраняет трение и уменьшает механические возмущения, позволяя достигнуть высокую повторяемость позиционирования.

Уравнения механического равновесия ПЛШД:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 X}{\mathrm{d}t^2} = \dfrac{1}{m_{me}} \cdot \left(F_{X1} + F_{X2} - F_{L,X}\right), \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 Y}{\mathrm{d}t^2} = \dfrac{1}{m_{me}} \cdot \left(F_{Y1} + F_{Y2} - F_{L,Y}\right), \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 \varphi}{\mathrm{d}t^2} = \dfrac{1}{J_{me}} \cdot \left(\left(-F_{X1} + F_{X2} + F_{Y1} - F_{Y2}\right) \cdot l - T_L\right), \end{cases} \quad (1)$$

где F_{X1}, F_{X2}, F_{Y1}, F_{Y2} – силы, развиваемые осевыми двигателями, m_{me} – масса якоря с нагрузкой, J_{me} – момент инерции якоря с нагрузкой относительно оси вращения, l – плечо приложения сил, $F_{L,X}$, $F_{L,Y}$, T_L – нагрузка.

Сила F, развиваемая осевым двигателем, аппроксимируется как:

$$F = p \cdot \Psi_{M1} \cdot \left(-I_\alpha \cdot \sin(\theta) + I_\beta \cdot \cos(\theta)\right) - F_{cog,\max} \cdot \sin(4\theta). \quad (2)$$

где $p = 2\pi/\tau_p$ – эквивалентное число пар полюсов линейного двигателя, τ_p – механический период ПЛШД, $\theta = p \cdot X$ – электрическое положение двигателя (для оси X), Ψ_{M1} – амплитуда первой гармоники потокосцепления возбуждения постоянных магнитов, I_α, I_β – токи в фазах; зубцовая сила постоянного магнита аппроксимируется как знакопеременное возмущение с амплитудой $F_{cog,\max}$, не зависящей от тока.

Разворот якоря по оси φ приводит к изменению относительного геометрического расположения зубцовых зон якоря и статора, что уменьшает максимальную силу двигателя. Таким образом, основными внутренними возмущениями ПЛШД являются разворот двигателя по оси φ и зубцовые силы осевых двигателей.

Цифровое управляющее устройство реализовано в виде трехосевого блока управления и предназначено для обработки сигналов и реализации законов управления и регулирования ПЛШД и электропривода на его основе.

Для достижения высокой точности, электропривод имеет обратные связи по положению всех осей (X, Y, φ). Система управления строится на базе цифровых ПИД-регуляторов положения с прямой связью по ускорению трех осей, блока распределения сил и аналогового контура регулирования тока. Обратные связи по положению организуются при помощи интегрированной в якорь трехосевой системы измерения положения (СИП) на базе трех линейных датчиков на элементах Холла ($X1$, $X2$ и Y):

$$\begin{cases} X = (X1 + X2)/2, \\ Y = Y, \\ \varphi = \arctan((X1 - X2)/L_{hx}), \end{cases} \quad (3)$$

где L_{hx} – расстояние между датчиками положения $X1$, $X2$.

Планарный вентильный двигатель (ПВД) создается на основе ПЛШД, работающего в режиме самокоммутации за счет положительной обратной связи по положению, что позволяет обеспечивать значительные ускорения. Управление ВД в подвижных координатах (dq) происходит за счет управления заданиями токов I_d^*, I_q^*:

$$\begin{cases} I_d^* = I_m^* \cdot \cos(\psi_i^*), \\ I_q^* = I_m^* \cdot \sin(\psi_i^*), \end{cases} \quad (4)$$

где I_m^* – амплитуда задания тока, ψ_i^* – заданный угол коммутации вектора тока. Управление амплитудой и углом коммутации тока в функции скорости V позволяет расширять скоростной диапазон ПВД.

Для планирования траектории движения планарного электропривода используется двухкоординатный генератор траектории, который содержит упрощенную безынерционную модель идеального планарного двигателя. На основании этой модели рассчитывается программа ускорения для реализации положения, скорости, ускорения.

Основным элементом, определяющим точность позиционирования электропривода, является система измерения положения. СИП состоит из первичного преобразователя (ПП или датчик положения – ДП) и цифрового интерполятора (ЦИ), преобразующего аналоговые сигналы датчика в цифровой код положения.

В планарном электроприводе могут использоваться СИП на базе оптических, индуктивных, и емкостных ДП. При этом ДП в качестве шкалы могут использовать как зубцы статора планарного двигателя, так и независимую измерительную шкалу.

Достоинства независимой измерительной шкалы: температурная стабильность и высокая точность изготовления. Недостатки: ограниченный ход, сложность установки в планарный двигатель и сложность юстировки. Зубчатая структура статора планарного двигателя изготавливается с высокой точностью (±10 мкм), что позволяет использовать ее в качестве измерительной шкалы. Однако, точность будет определяться качеством изготовления и дефектами статора. Данные погрешности могут быть усреднены за счет увеличения размеров ДП и скорректированы с помощью калибровки планарного электропривода.

Основными требованиями к СИП в соответствии с решаемой задачей являются:

1. низкая стоимость,
2. измерение положения в плоскости XY с разрешением и повторяемостью не хуже 1 мкм,

3. измерение положения по оси φ с разрешением и повторяемостью не хуже 1 угл. минуты, работоспособность при развороте более, чем на 1 угл. градус.

В качестве ДП прецизионного планарного электропривода наиболее перспективен емкостный ДП. Емкостный ДП нечувствителен к магнитному полю двигателя, что позволяет получить высокую повторяемость. Низкая стоимость СИП обеспечивается за счет использования статора ПЛШД в качестве измерительной шкалы и реализации чувствительного элемента и цифрового интерполятора СИП по технологии печатных плат.

Таким образом, способами увеличения точности позиционирования планарного электропривода при сохранении его стоимости являются: разработка СИП на базе емкостного ДП и ЦИ, интегрированной в якорь ПЛШД, и разработка метода калибровка планарного электропривода по всей рабочей поверхности.

Во **второй главе** приводятся результаты разработки емкостной системы измерения положения. Функциональная схема емкостной СИП представлена на рис. 1.

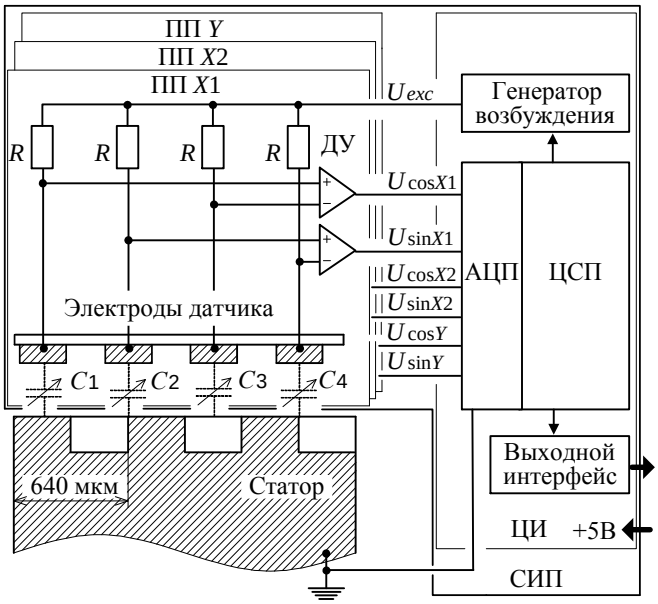


Рис. 1. Функциональная схема емкостной системы измерения положения.

СИП состоит из платы чувствительного элемента и плат ЦИ, включая плату цифрового сигнального процессора (ЦСП) и плату выходного интерфейса. Плата чувствительного элемента оснащается тремя элементарными емкостными ПП. ПП $X1$, $X2$ расположены симметрично относительно центра платы чувствительного элемента и измеряют положения по осям X и φ (3). ПП Y размещен в центре платы ПП. СИП выполнена в виде отдельного модуля и размещается в центре якоря ПЛШД.

Принцип действия емкостного ДП основан на изменении емкостей, образованных электродами датчика и заземленными зубцами статора планарного двигателя. Емкость плоского конденсатора C пропорциональна площади перекрытия электродов датчика и зубцов статора S:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S/h, \qquad (5)$$

где h – воздушный зазор между статором и поверхностью электрода; ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; ε_0 – электрическая постоянная.

ПП выполняется по принципу синусно-косинусного датчика и имеет 4 электрода, расположенных над тремя зубцами статора со сдвигом относительно друг друга на ¾ периода зубцов. При движении якоря изменяются емкости и баланс напряжений на плечах моста так, что напряжения на выходах дифференциальных усилителей (ДУ) представляют собой пару квадратурных амплитудно-модулированных сигналов $U_{\sin}$, $U_{\cos}$:

$$\begin{cases} U_{exc}(t) = U_{\max\, exc} \sin(2\pi f_{exc} t), \\ U_{\sin}(\theta, t) = U_{\max} \sin(\theta) \sin(2\pi f_{exc} t + \psi), \\ U_{\cos}(\theta, t) = U_{\max} \cos(\theta) \sin(2\pi f_{exc} t + \psi), \end{cases} \qquad (6)$$

где U_{exc} – напряжение возбуждения датчика, $U_{\max\, exc}$ – амплитуда напряжение возбуждения, f_{exc} – частота возбуждения, $U_{\max}$ – амплитуда сигналов $U_{\sin}$, $U_{\cos}$, ψ – фаза сигналов относительно напряжения возбуждения. Частота возбуждения была выбрана исходя из требований обеспечения не менее 10 выборок сигнала на скорости движения 1 м/с и минимизации влияния паразитных емкостей.

Сигналы ДП $U_{\sin}$, $U_{\cos}$ поступают в АЦП, входящий в состав ЦСП. После цифровой обработки сигналы передаются в блок управления по стандартному аналоговому интерфейсу (синус/косинус, размах 1В).

Для обеспечения высокой чувствительности и низкого коэффициента нелинейных искажений (КНИ), форма ПП была оптимизирована. По результатам оптимизации КНИ не превышает 2%, чувствительность равняется 0.18, датчик остается в работоспособном состоянии при развороте на 2 угл. градуса.

Обработка амплитудно-модулированных сигналов емкостного ДП осуществляется в ЦИ. ЦИ имеет два режима работы: нормальный режим и режим инициализации (рис. 2). Нормальный режим работы СИП требует выполнения предварительной процедуры инициализации один раз после установки СИП в якорь планарного двигателя. Режим инициализации требует специальной совместной работы двигателя и СИП и осуществляет подготовку и адаптацию датчика к конкретному двигателю.

Рис. 2. Структура программного модуля цифрового интерполятора.

В нормальном режиме работы последовательно выполняются:

1. Импульсная демодуляция сигналов, т.е. выделение из амплитудно-модулированного сигнала составляющей, зависящей от положения датчика, которое заключается в выборке сигналов датчика в моменты времени, когда высокочастотная составляющая равна единице:

$$\begin{cases} \sin(2\pi f_{exc} t + \psi_s)\big|_{t=t_{\text{ad}}(n)} \approx \sin(2\pi f_{exc} t + \psi_c)\big|_{t=t_{\text{ad}}(n)} = 1, \\ U_{\sin}(\theta, t)\big|_{t=t_{\text{ad}}(n)} = U_{\max} \sin(\theta(n)), \\ U_{\cos}(\theta, t)\big|_{t=t_{\text{ad}}(n)} = U_{\max} \cos(\theta(n)). \end{cases} \quad (7)$$

2. Фильтрация сигналов за счет многократной импульсной демодуляции с частотой 1 МГц, количество высокочастотных выборок m_f:

$$U_{\sin}^{filt}(\theta(n)) = \frac{1}{m_f} \cdot \sum_{n_f=1}^{m_f} U_{\sin}(\theta(n_f)), U_{\cos}^{filt}(\theta(n)) = \frac{1}{m_f} \cdot \sum_{n_f=1}^{m_f} U_{\cos}(\theta(n_f)). \quad (8)$$

3. Коррекция постоянных составляющих $O_{\sin}$, $O_{\cos}$ и разницы амплитуд $A_{\sin}$, $A_{\cos}$, как основных нелинейностей сигналов:

$$\begin{cases} U_{\sin}^{cor}(\theta(n)) = \left(U_{\sin}(\theta(n)) - \hat{O}_{\sin}\right)/\hat{A}_{\sin} \approx \sin(\theta(n)), \\ U_{\cos}^{cor}(\theta(n)) = \left(U_{\cos}(\theta(n)) - \hat{O}_{\cos}\right)/\hat{A}_{\cos} \approx \cos(\theta(n)). \end{cases} \quad (9)$$

4. Программное выравнивание датчиков $X1$, $X2$ по оси φ на угол $\Delta\theta_{12}$:

$$\begin{cases} U_{\sin}^{align}(\theta_{X1}(n)) = U_{\sin}^{cor}(\theta_{X1}(n)) \cdot \cos(\Delta\theta_{12}) - U_{\cos}^{cor}(\theta_{X1}(n)) \cdot \sin(\Delta\theta_{12}), \\ U_{\cos}^{align}(\theta_{X1}(n)) = U_{\cos}^{cor}(\theta_{X1}(n)) \cdot \cos(\Delta\theta_{12}) + U_{\sin}^{cor}(\theta_{X1}(n)) \cdot \sin(\Delta\theta_{12}), \\ U_{\sin}^{align}(\theta_{X2}(n)) = U_{\sin}^{cor}(\theta_{X2}(n)) \cdot \cos(\Delta\theta_{12}) + U_{\cos}^{cor}(\theta_{X2}(n)) \cdot \sin(\Delta\theta_{12}), \\ U_{\cos}^{align}(\theta_{X2}(n)) = U_{\cos}^{cor}(\theta_{X2}(n)) \cdot \cos(\Delta\theta_{12}) - U_{\sin}^{cor}(\theta_{X2}(n)) \cdot \sin(\Delta\theta_{12}). \end{cases} \quad (10)$$

5. Преобразование цифровых сигналов в аналоговые с помощью ЦАП.

Суммарное время обработки сигналов составляет 25 мкс.

Алгоритм инициализации выполняет последовательно:

1. Автоматический поиск момента считывания $t_{ad}(n)$ с помощью изменения фазы сигнала возбуждения при сохранении частоты и момента считывания.

2. Автоматический поиск экстремумов сигналов датчика внутри одного периода, для чего требуется перемещение двигателя в микрошаговом режиме на 3 периода или более, и вычисления параметров коррекции по формулам:

$$\begin{cases} \hat{A}_{\sin} = \left(\max\left(U_{\sin}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right) - \min\left(U_{\sin}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right)\right)/2, \\ \hat{A}_{\cos} = \left(\max\left(U_{\cos}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right) - \min\left(U_{\cos}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right)\right)/2, \\ \hat{O}_{\sin} = \left(\max\left(U_{\sin}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right) + \min\left(U_{\sin}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right)\right)/2, \\ \hat{O}_{\cos} = \left(\max\left(U_{\cos}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right) + \min\left(U_{\cos}\left(\theta(n)\big|_0^{2\pi}\right)\right)\right)/2. \end{cases} \quad (11)$$

3. Автоматический поиск рассогласования $\Delta\theta_{12}$, с помощью вычисления и усреднения положения датчиков $X1$, $X2$, что требует первоначального завершения алгоритма коррекции сигналов (9):

$$\Delta\theta_{12} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{16} \left(\arctan\left(\frac{U_{\sin}^{cor}(\theta_{X1}(n))}{U_{\cos}^{cor}(\theta_{X1}(n))} \right) - \arctan\left(\frac{U_{\sin}^{cor}(\theta_{X2}(n))}{U_{\cos}^{cor}(\theta_{X2}(n))} \right) \right) \Big/ 16. \quad (12)$$

На рис. 3 представлен прототип якоря ПЛШД (вид снизу) с интегрированной емкостной СИП.

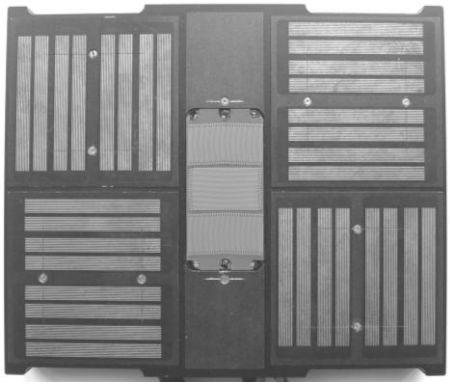


Рис. 3. Якорь прототипа ПЛШД с интегрированной емкостной СИП

На рис. 4 (а) показана фигура Лиссажу канала $X1$ емкостной СИП в процессе инициализации при перемещении двигателя на 12 периодов (7.68 мм) со скоростью 5 мм/с. Сигналы СИП корректируются по разработанному алгоритму до уровня ±0.45 В. На рис. 4 (б) представлены результаты определения разрешения σ емкостной СИП. В качестве эталонных датчиков использовались лазерные интерферометры. Разрешение определяется по формуле:

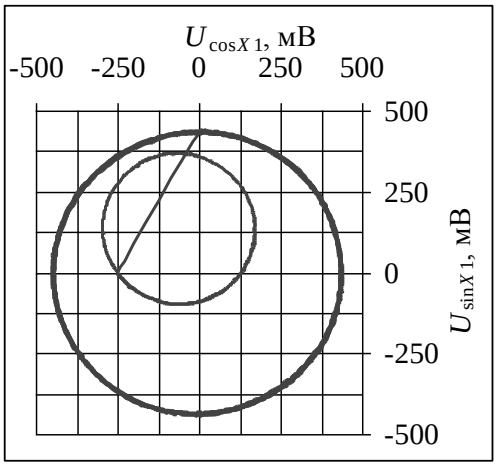
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_s - 1} \cdot \sum_{k=1}^{n_s} \left(x(n) - \bar{x}\right)^2}\,;\ \bar{x} = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_{k=0}^{n_s} x(n), \qquad (13)$$

где k – номер выборки, n_s – общее число выборок, положение $x(n)$ вычисляется с помощью арктангенского преобразования:

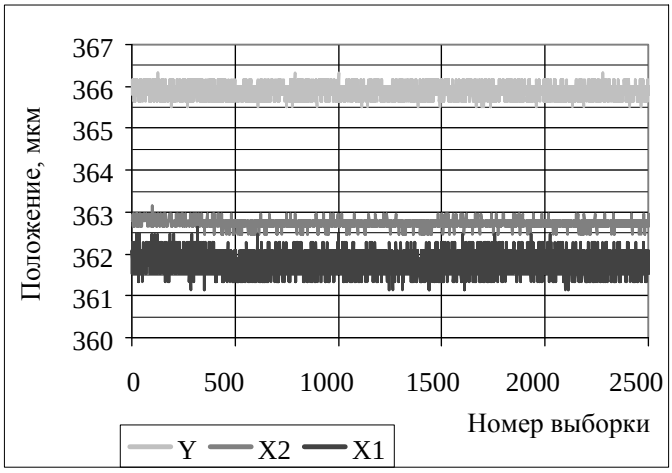
$$x(n) = \frac{\tau_p}{2\pi} \cdot \arctan\left(\frac{U_{\sin}(\theta(n))}{U_{\cos}(\theta(n))}\right). \qquad (14)$$

Разрешение емкостной СИП составило:

$$\sigma_{sX} = 0.235\,\text{мкм}, \sigma_{sY} = 0.168\,\text{мкм}, \sigma_{s\varphi} = 1.9\,\text{угл.секунд}. \qquad (15)$$



(а)



(б)

Рис. 4. Фигуры Лиссажу опытного образца емкостной СИП в процессе инициализации (а) и разрешение емкостной СИП (б).

В **третьей главе** приводятся результаты аттестации разрешения и точности позиционирования планарного электропривода с емкостной СИП. Аттестационный стенд состоит из: однолучевого лазерного интерферометра для измерения положения по оси Y, трехлучевого лазерного интерферометра для измерения положения по осям X, φ, Г-образного отражателя, установленного на якоре ПЛШД. Стенд располагается на виброзащищенном основании.

На рис. 5 представлены результаты позиционирования планарного электропривода с микронным шагом одновременно по осям X, Y, время останова в каждой точке составляет 500 мс. Положение измерено с помощью лазерных интерферометров. Видно, что разработанный планарный электропривод обеспечивает субмикронное разрешение (0.5 мкм) на всей площади рабочей поверхности якоря.

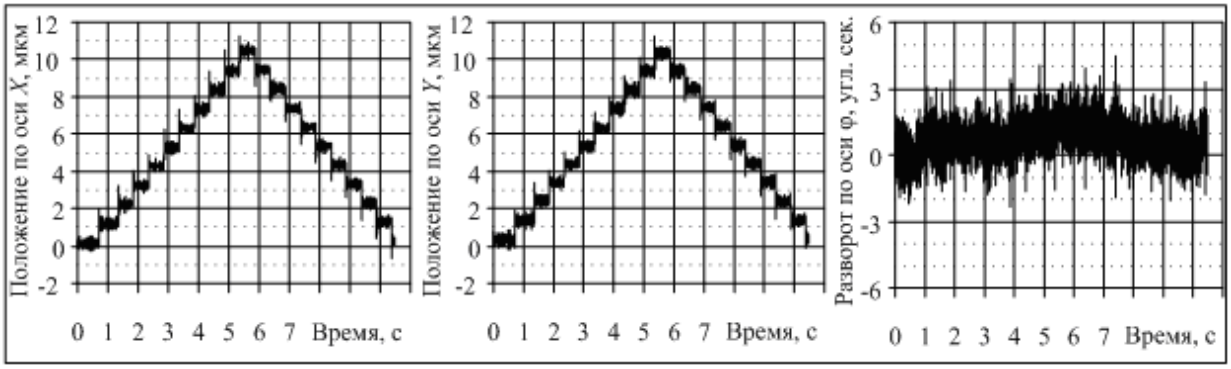


Рис. 5. Позиционирование планарного электропривода с емкостной СИП.

На основании базового метода проверки точности одноосевых станков с числовым управлением ИСО 230-2 (ГОСТ 27843-2006) был разработан метод проверки точности планарного электропривода. Метод заключается в последовательном позиционировании планарного электропривода "змейкой" в плоскости *XY* (рис. 6).

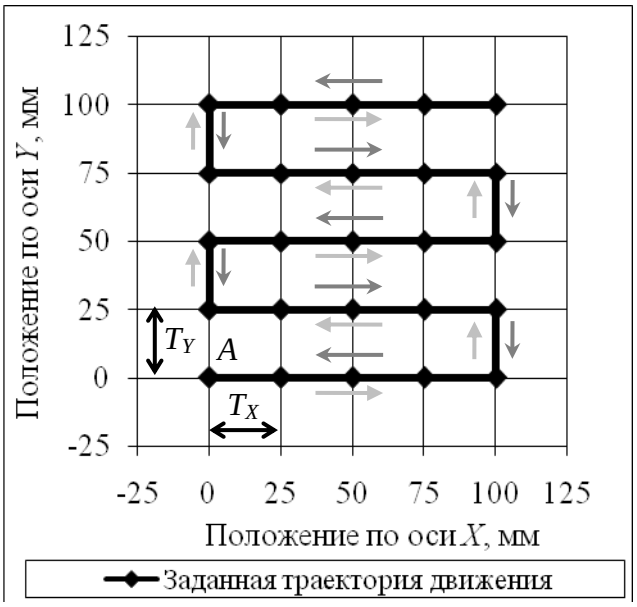


Рис. 6. Траектория аттестация точности планарного электропривода.

Последовательность проверки точности электропривода:

1. выполняется автоматический процесс «причаливания» («homing») якоря в начальное положение (точка А),
2. двигатель перемещается из точки в точку в замкнутом по положению режиме с шагом T_X по оси *X* и T_Y по оси *Y*,
3. положение измеряется с помощью лазерного интерферометра в каждой точке после полной остановки двигателя в заданном положении,
4. траектория повторяется 5 раз в прямом и обратном направлении;
5. позиционные отклонения рассчитываются согласно стандартам ИСО 230-2.

Шаги траекторной сетки выбираются таким образом, чтобы, было обеспечено минимум пять точек на всем ходу $X_{\max}$, $Y_{\max}$ и, шаги не совпадали с систематической ошибкой, связанной с периодом зубцов статора:

$$T_X = X_{\max}/(5+n) \neq n \cdot \tau_p, T_Y = Y_{\max}/(5+n) \neq n \cdot \tau_p, n = 0,1,2... \quad (16)$$

Позиционное отклонение при аттестации включает искомую составляющую, вызванную погрешностью планарного электропривода, и составляющую, вызванную погрешностью измерения. Последняя вносит существенную ошибку и должна быть устранена. Коррекция погрешности измерения базируется на геометрической модели аттестационного стенда. Координаты аттестационной системы измерения описываются в осях $X_{\text{изм}}$, $Y_{\text{изм}}$, $\varphi_{\text{изм}}$. Коррекция выполняется в несколько этапов:

1. Коррекция неортогональности β измерительных осей:

$$\begin{cases} X^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} = X_{\text{изм},ij}, \\ Y^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} = Y_{\text{изм},ij}/\cos(\beta - \pi/2) + X_{\text{изм},ij} \cdot \tan(\beta - \pi/2), \end{cases} \quad (17)$$

где $i = 1 \ldots i_m$ – номер заданной позиции, $j = 1 \ldots j_m$ – номер подхода к заданной позиции.

2. Вычисление угла разворота α измерительных осей относительно осей движения и коррекция несоосности измерительных осей:

$$\alpha = \frac{1}{i_m} \cdot \sum_{i=1}^{i_m} \left(\arctan\left(Y_i^* / X_i^*\right) - \arctan\left(Y^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} / X^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij}\right)\right),$$

$$\begin{cases} X^{\text{кор2}}_{\text{изм},ij} = X^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} \cdot \cos(-\alpha) + Y^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} \cdot \sin(-\alpha), \\ Y^{\text{кор2}}_{\text{изм},ij} = -X^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} \cdot \sin(-\alpha) + Y^{\text{кор1}}_{\text{изм},ij} \cdot \sin(-\alpha), \end{cases} \quad (18)$$

где X_i^*, Y_i^* – координаты заданной позиции.

3. Коррекция погрешности, вызванной разворотом двигателя и зависящей от геометрического расположения Г-образного зеркала относительно геометрического центра якоря:

$$\begin{cases} X^{\text{кор3}}_{\text{изм},ij} = X^{\text{кор2}}_{\text{изм},ij} - X_{\text{см}} + \left(\left(Y_i^* - Y_0\right) \cdot \tan\left(\varphi_{\text{изм},ij}\right) + X_{\text{см}}/\cos\left(\varphi_{\text{изм},ij}\right)\right), \\ Y^{\text{кор3}}_{\text{изм},ij} = Y^{\text{кор2}}_{\text{изм},ij} + Y_{\text{см}} - \left(\left(X_i^* - X_0\right) \cdot \tan\left(\varphi_{\text{изм},ij}\right) + Y_{\text{см}}/\cos\left(\varphi_{\text{изм},ij}\right)\right), \end{cases} \quad (19)$$

где $X_{\text{см}}$, $Y_{\text{см}}$ – смещение отражающей поверхности зеркала относительно геометрического центра якоря, X_0, Y_0 – координаты точек измерения относительно начальной точки движения А.

Результаты аттестации точности прототипа планарного электропривода с емкостной СИП приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты аттестация точности планарного электропривода.

X	Двустороння повторяемость позиционирования	0.708 мкм
	Двустороння точность позиционирования	4.748 мкм
Y	Двустороння повторяемость позиционирования	0.613 мкм
	Двустороння точность позиционирования	13.409 мкм

φ	Двустороння повторяемость позиционирования	4.1 угл. секунд
	Двустороння точность позиционирования	31.8 угл. секунд

В **четвертой главе** исследуются методы калибровки планарных электроприводов и разрабатывается метод калибровочных таблиц малой размерности. Классический метод калибровки требует построения двумерных калибровочных таблиц, размер которых для планарного электропривода с периодом СИП 640 мкм и шагом таблицы 80 мкм превышает 10^6 точек на площади 100 × 100мм^2, что требует экстремально большого времени построения таблицы, делая данный метод неприменимым.

Погрешность позиционирования планарного электропривода складывается из погрешности СИП и дефектов статора планарного двигателя. В связи с этим, предлагается разбить погрешности позиционирования на соответствующие короткопериодную и длиннопериодную составляющие, что уменьшит размеры и время построения таблиц.

Разработан метод калибровки короткопериодной погрешности, основанный на геометрических особенностях емкостного ДП. Короткопериодная калибровочная таблица для каждой оси представляет собой одномерный массив значений с линейной интерполяцией между точками, период калибровочной таблицы $L_{\text{КП}}$ = 1920 мкм (3 периода статора):

$$\begin{cases} X_{\text{КП}}^{\text{калиб}} = X - X_{\text{КП}}(X), \\ Y_{\text{КП}}^{\text{калиб}} = Y - Y_{\text{КП}}(Y), \\ \varphi_{\text{КП}}^{\text{калиб}} = \varphi - \varphi_{\text{КП}}(X), \end{cases} \tag{20}$$

где $X_{\text{КП}}(X), Y_{\text{КП}}(Y), \varphi_{\text{КП}}(X)$ – значение короткопериодной калибровочной таблицы.

Построение короткопериодной калибровочной таблицы выполняется с помощью аттестационного датчика по следующему алгоритму:

1. Автоматическое «причаливание» планарного электропривода в начальную точку А.
2. Позиционирование в замкнутом по положению режиме с шагом 80 мкм одновременно по осям *X*, *Y* на расстояние $L_{\max}$, кратное периоду короткопериодной погрешности.
3. Показания лазерного интерферометра сохраняются в каждой точке после остановки.
4. Вычисляются значения калибровочной таблицы в каждой точке, как разница между позицией, измеренной с помощью емкостной системы измерения положения, и действительной позицией, измеренной с помощью лазерного интерферометра с учетом коррекции погрешности измерения.
5. Короткопериодная калибровочная таблица строится за счет усреднения каждого элемента на нескольких периодах короткопериодной погрешности.

Для калибровки длиннопериодной погрешности по трем осям используется двумерная калибровочная таблица с линейной интерполяцией между точками:

$$\begin{cases} X_{\text{ДП}}^{\text{калиб}} = X_{\text{КП}}^{\text{калиб}} - X_{\text{ДП}}(X,Y), \\ Y_{\text{ДП}}^{\text{калиб}} = Y_{\text{КП}}^{\text{калиб}} - Y_{\text{ДП}}(X,Y), \\ \varphi_{\text{ДП}}^{\text{калиб}} = \varphi_{\text{КП}}^{\text{калиб}} - \varphi_{\text{ДП}}(X,Y), \end{cases} \quad (21)$$

где $X_{\text{ДП}}(X,Y), Y_{\text{ДП}}(X,Y), \varphi_{\text{ДП}}(X,Y)$ – значение длиннопериодной калибровочной таблицы.

Построение длиннопериодной калибровочной таблицы выполняется с помощью аттестационного датчика по следующему алгоритму:

1. Автоматическое «причаливание» планарного электропривода в начальную точку А.

2. Позиционирование в замкнутом по положению режиме с шагом $T_{\text{ДП},X}$ по оси X и с шагом $T_{\text{ДП},Y}$ по оси Y по траектории "змейка" по всей рабочей поверхности (аналогично траектории, представленной на рис. 6).

3. Показания лазерного интерферометра сохраняются в каждой точке после остановки.

4. К каждой позиции, измеренной с помощью емкостной системы измерения положения, применяется короткопериодная калибровка.

5. Вычисляются значения калибровочной таблицы в каждой точке, как разница между позицией, измеренной с помощью емкостной системы измерения положения, и действительной позицией, измеренной с помощью лазерного интерферометра с учетом коррекции погрешности измерения.

Шаги длиннопериодной калибровочной таблицы $T_{\text{ДП},X}$, $T_{\text{ДП},Y}$ выбираются кратными периоду статора (640 мкм) и не менее периода длиннопериодной калибровочной таблицы (1920 мкм).

Использование предложенной методики калибровки позволяет уменьшить размеры калибровочной таблицы по одной оси для диапазона перемещений 83x83 мм с 1076406 точек с шагом 80 мкм по осям X, Y до 193 точек с шагом короткопериодной таблицы 80 мкм и шагами длиннопериодной таблицы 6400 мкм. Калибровка планарного электропривода включается в контур обработки обратной связи по положению в виде последовательной короткопериодной и длиннопериодной коррекции и требует модернизации системы управления.

Ожидаемым результатом калибровки прецизионного планарного электропривода, выполненного по опытным данным, является увеличение точности позиционирования до ±2.5 мкм на всей рабочей области.

Важным условием стабильности калибровки является высокая повторяемость автоматического «причаливания» планарного электропривода в начальную точку, относительно которой построена калибровочная таблица, что гарантируется субмикронной повторяемостью емкостной СИП. Кроме того, должны быть обеспечены термостабильные условия работы планарного

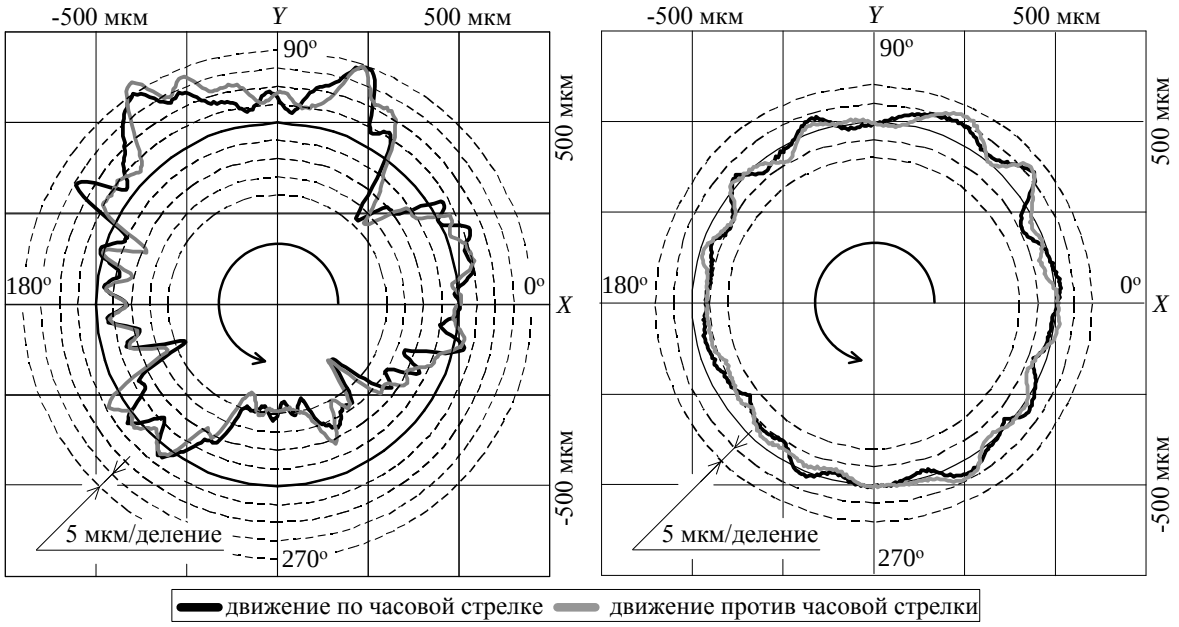
электропривода, что автоматически подразумевается в прецизионных применениях.

В **пятой главе** исследуется точность траекторных движений разработанного прецизионного планарного электропривода с емкостной СИП. Для аттестации траекторной точности были заданны стандартные траектории движения в плоскости *XY* по кругу согласно стандарту ИСО 230-4. Траекторное отклонение Δe вычисляется, как разница между действительной позицией, измеренной с помощью лазерного интерферометра, и заданной позицией:

$$\begin{cases} \Delta e_X = X_{\text{изм}} - X^*, \\ \Delta e_Y = Y_{\text{изм}} - Y^*, \\ \Delta e_\varphi = \varphi_{\text{изм}} - \varphi^*. \end{cases} \tag{22}$$

На рис. 6. (а) представлена измеренная с помощью лазерного интерферометра траектория движения диаметром D = 1 мм и контурной скоростью $V_{\max}^*$ = 10 мм/с планарного электропривода с датчиками положения на элементах Холла, а на рис. 6. (б) – разработанного планарного электропривода с емкостной СИП. Были использованы заводские настройки параметров ПИД-регуляторов. Измеренные траектории построены в полярных координатах с шагом сетки 5 мкм. Траекторное отклонение увеличено в 10 раз относительно декартовых координат *XY*:

$$\begin{cases} X_{\text{изм}} = X^* + 10 \cdot \left(X_{\text{изм}} - X^*\right), \\ Y_{\text{изм}} = Y^* + 10 \cdot \left(Y_{\text{изм}} - Y^*\right). \end{cases} \tag{23}$$



(а) (б)

Рис. 6. Измеренные погрешности траектории движения планарного электропривода с датчиками положения на элементах Холла (а) и разработанного прототипа планарного электропривода с емкостной СИП (б).

Разработанный прецизионный планарный электропривод с емкостной СИП более чем в 3 раза превосходит по точности отработки заданной траектории планарный электропривод с датчиками положения на элементах Холла.

Основными недостатками, ухудшающими динамическую точность планарного электропривода, являются отсутствие учета максимальной скорости изменения ускорения при генерации траектории и отсутствие компенсации зубцовых сил ПЛШД. Для увеличения траекторной точности требуется: программная компенсации зубцовых сил и модернизация генератора траектории.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты по диссертационной работе.

В **приложении** представлен список используемых сокращений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена актуальная задача повышения точности планарного электропривода в низком ценовом сегменте рынка за счёт использования емкостной системы измерения положения и калибровки планарного электропривода.

На основании выполненных автором исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. Исследованы способы значительного увеличения точности планарного электропривода при сохранении его стоимости с помощью использования емкостной системы измерения положения и калибровки планарного электропривода.
2. Разработана емкостная система измерения положения, обеспечивающая измерение положения по трем осям (X, Y, φ) с субмикронным и секундным разрешением.
3. Разработаны методы цифровой обработки и автоматического повышения точности синусно-косинусных датчиков положения с амплитудной модуляцией.
4. Разработан метод аттестации и стенд для проверки точности планарного электропривода.
5. Разработан метод калибровки планарного электропривода с помощью малоразмерной таблицы, содержащей одномерную короткопериодную и двумерную длиннопериодную таблицы. Разработан метод построения калибровочных таблиц.
6. Разработанным планарным электроприводом достигнуто увеличение позиционной и траекторной точности более, чем 3 раза по сравнению с серийным образцом планарного электропривода в низком ценовом сегменте.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. **Тяпкин М.Г., Балковой А.П. Емкостный датчик положения планарного электропривода. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (81). – С. 65–70.**
2. **Тяпкин М.Г., Балковой А.П. Интегрированный емкостный датчик положения планарного электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1.– С. 111–114.**
3. Тяпкин М.Г. Автоматическая коррекция сигналов синусно-косинусного датчика положения // Электропривод и системы управления. Труды МЭИ. Выпуск 686. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2010. – С. 28–38.
4. Тяпкин М.Г. Автоматическая коррекция сигналов синусно-косинусного датчика положения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы доклада в 3 томах. Том 2. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2011. – С. 173–174.
5. Тяпкин М.Г. Емкостной датчик положения планарного электропривода // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы доклада в 3 томах. Том 2. – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2012. – С. 334.
6. Тяпкин М.Г. Прецизионный планарный электропривод // XLII Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи «Федоровские Чтения 2012». Москва: Издательский дом МЭИ. – 2012. – С. 98–100.
7. Балковой А.П., Тяпкин М.Г. Планарный линейный шаговый двигатель с датчиком положения // Труды VII Международной конференции АЭП 2012. Иваново. – 2012. – С. 365–369.