

На правах рукописи



АБДИРАШЕВ Омирзак Коптилеуулы

**СНИЖЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

**Специальность 2.2.11 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (технические науки)**

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

ПЕНЗА – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» на кафедре «Информационно-измерительная техника и метрология».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Трофимов Алексей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Чернышова Татьяна Ивановна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет»; профессор кафедры
«Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем»;

Львов Алексей Арленович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю. А.»;
профессор кафедры «Информационно-
коммуникационные системы и программная
инженерия»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tekhnicheskie_nauki/abdirashev

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) предполагает широкое использование датчиков. Датчики являются первичным звеном любой информационно-измерительной системы и в значительной мере определяют ее метрологические характеристики. Проектирование систем управления и контроля, в которые входит большое количество датчиков различных параметров, связано с некоторыми трудностями. Датчики подобных систем имеют различные принципы действия, часто требуют индивидуальных источников питания и устройств обработки информации. Разнообразие входных измеряемых параметров ставит задачу создания типовых рядов датчиков, которые целесообразно использовать для удовлетворения тех или иных потребностей при сборе первичной измерительной информации.

Как правило, при создании ИИУС контроля и управления датчиковой аппаратурой, систем роботизации и автоматизированного управления используют большое количество электромагнитных преобразователей (ЭМП). При этом каждый ЭМП имеет свой собственный источник электропитания и вторичную преобразующую аппаратуру. Для разработки измерительных преобразователей параметров механических перемещений в электрические сигналы используются различные физические явления, среди которых самым распространенным считается использование взаимного влияния обмоток через переменное электромагнитное поле. Измерительные ЭМП параметров механических перемещений используют эффект изменения взаимной электромагнитной связи при взаимном механическом смещении обмоток. В качестве информационного признака выходного электрического сигнала в этом случае может быть использована амплитуда выходного сигнала, его частота или изменение фазы выходного напряжения.

В работе представлена ИИУС для контроля и управления датчиковой аппаратурой в системах роботизации при автоматизированном управлении с применением принципиально новой и оригинальной конструкции электромагнитной системы (ЭМС), имеющей свойство менять выходное напряжение при прямом и обратном движении неоднородного распределенного магнитопровода (шунта). ЭМС представляет собой датчик линейных перемещений с вращающимися фазами – электромагнитный фазовращатель (ЭМФ).

Таким образом, актуальной задачей является снижение систематических погрешностей ИИУС датчиков линейных перемещений на основе ЭМФ.

Проблемам создания современных информационно-измерительных систем (ИИС) посвящены труды Е. А. Ломтева, Е. А. Мокрова, А. И. Мартяшина, В. А. Грановского, Л. Ф. Куликовского, В. С. Мелентьева, В. М. Шляндина, Э. И. Цветкова и др. Большой вклад в теорию организации и оптимизации современных ИИС внесли В. Ю. Артемьев, А. А. Романов, Е. А. Нестеров, С. А. Федотов, А. С. Селиванов, Г. Г. Ступак, В. А. Селин, В. М. Ватулин, В. Г. Алыбин, Н. В. Карутин и др. Наиболее эффективные решения синтеза ИИС на основе электромагнитных преобразователей предложены в научно-производственном объединении «Измерительная техника» (г. Королев), а также Turck Industrial Automation, Balluff, MTS Sensors Temposonics (Germany) АО «НИИФИ» и др.

Для анализа существующих ИИУС с датчиками линейных перемещений на основе ЭМФ применяется теория электромагнитного взаимодействия обмоток, которая положена в основу трудов А. А. Ахметжанова и А. А. Батоврина. Однако использование обобщенного магнитного потока в качестве базового положения в теории ЭМФ не позволяет учесть влияние большинства конструктивных параметров магнитопровода на погрешность датчика.

Отметим, что используемые методики проектирования датчиков ориентированы на получение параметров элементов конструкции исходя из энергетических характеристик. А достаточно полная теория многофакторного эксперимента позволяет выработать рекомендации по проведению многофакторных испытаний. Из этого следует, что воздействие конструктивных влияющих факторов на погрешность ИИУС механических величин изучено не в полном объеме. Практически полностью отсутствует теория проектирования измерительных систем механических величин из условия получения заданных метрологических характеристик измерительной системы.

Целью диссертационной работы является снижение систематической погрешности информационно-измерительной системы динамических перемещений путем улучшения метрологических характеристик электромагнитных преобразователей на основе электромагнитных фазовращателей с неоднородным распределенным магнитопроводом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ конструкций ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом для изучения систематических погрешностей ИИУС;
- 2) провести анализ источников систематической погрешности измерения ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом для датчиков линейных перемещений;
- 3) скорректировать функцию преобразования системы на основе неоднородного распределенного магнитопровода с ЭМФ для снижения систематических погрешностей ИИУС;
- 4) разработать улучшенный алгоритм функционирования измерительной системы линейных перемещений, позволяющий оценить систематические погрешности для проектирования ИИУС измерения механических перемещений;
- 5) создать методику анализа систематической погрешности измерений с учетом абсолютных погрешностей измерений по осям многомерного ортогонального пространства для повышения надежности датчиков линейных перемещений;
- 6) разработать структурную схему ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с неоднородным распределенным магнитопроводом ЭМФ;
- 7) внедрить разработанную методику и ИИУС в процесс создания датчиковой аппаратуры систем роботизации и автоматизированного управления.

Методы исследования. Теоретические исследования использованной ЭМС произведены путем использования системы удельных первичных параметров, что позволило получить достаточно точные формулы для вычисления электрических параметров разработанного датчика.

В качестве инструмента для исследования электрических параметров датчиков с учетом дискретности распределения электромагнитных параметров взята базовая имитационная модель ИИУС, позволяющая с высокой степенью точности изучать ее свойства. Имитационная модель позволила провести так называемые однофакторные испытания и определить степень влияния большинства конструктивных параметров на погрешность ИИУС.

Для анализа погрешности ИИУС с фазовыми датчиками и определения требований к параметрам элементов ИИУС может быть использована традиционная модель погрешности в форме многочлена, которая широко используется в теории многофакторного эксперимента. Для моделирования измерительной системы линейных перемещений использованы компьютерные среды MathCAD и MatLAB

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Скорректирована функция преобразования системы путем учета в электромагнитных преобразователях неоднородного распределенного магнитопровода, позволяющая снизить систематические погрешности ИИУС и применяемая в датчиковой аппаратуре систем роботизации и автоматизированного управления.

2. Разработан улучшенный алгоритм функционирования измерительной системы линейных перемещений, отличающийся введением блоков вычисления абсолютной погрешности от влияния дискретности информационной линейки и измерения ИИУС от перемещения шунта, позволяющий оценить систематические погрешности для проектирования ИИУС измерения механических перемещений (**специальность 05.11.16, п. 3**).

3. Создана методика анализа систематической погрешности измерительной системы линейных перемещений, учитывающая взаимное влияние факторов. Методика базируется на использовании разложения абсолютных погрешностей по осям многомерного ортогонального пространства.

4. Разработана структурная схема ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений в виде электромагнитного фазовращателя с неоднородным распределенным магнитопроводом с улучшенными метрологическими характеристиками за счет учета синусной и косинусной обмоток (**специальность 05.11.16, п. 6**).

Практическая значимость исследования. Полученные в диссертации теоретические и практические результаты путем внедрения ИИУС динамических перемещений на основе ЭМП с фазовращателем новой конструкции и неоднородным распределенным магнитопроводом позволяют улучшить метрологические характеристики электромагнитных преобразователей до 5 %. В совокупности с методикой анализа систематической погрешности ИИУС линейных перемещений позволяет увеличить надежность роботизированных и автоматизированных систем на 2 %. Улучшенный алгоритм функционирования устройства измерения линейных перемещений позволит в 1,5 раза точнее оценивать систематические погрешности измерений по осям многомерного ортогонального пространства, а скорректированная функция преобразования измерительной системы позволит до 4 % снизить систематические погрешности измерений ИИУС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Скорректированная функция преобразования системы на основе неоднородного распределенного магнитопровода с ЭМФ.

2. Улучшенный алгоритм функционирования измерительной системы линейных перемещений для анализа влияния конструктивных параметров ЭМФ, отличающийся введением блоков вычисления абсолютной погрешности для исключения влияния как дискретности информационной линейки, так и перемещения шунта.

3. Методика анализа систематической погрешности измерений, отличающаяся учетом абсолютных погрешностей измерений по осям многомерного ортогонального пространства.

4. Структурная схема ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с неоднородным распределенным магнитопроводом ЭМФ.

5. Реализация новой конструкции датчика линейных перемещений на основе ЭМФ с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Реализация и внедрение результатов работы:

1. Выбранная тема исследований является частью научной работы, которая проводится на кафедре «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» в рамках научно-исследовательской работы.

2. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедр «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и «Космическая техника и технология» НАО Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева при проведении лекционных и практических занятий.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических и научно-технических конференциях, семинарах, симпозиумах, электронных ресурсах: «Надежность и качество» (Пенза, 2018), «XXVI Международная научно-практическая конференция WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS–2018», «Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям Far East Con–2019», «Московский семинар по электронным и сетевым технологиям (MWENT) 2020».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе две статьи – в изданиях, индексируемых Scopus, три – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по главам, заключения, списка литературы, включающего 98 наименований, и четырех приложений. Основная часть изложена на 126 страницах, содержит 49 рисунков и 2 таблицы.

Личный вклад автора. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, разработке программ обеспечения натурального эксперимента, получении и анализе результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов диссертации. Разрабатываемая информационно-измерительная система служит для исследования теоретических и практических проблем, методов обеспечения контроля, создания и совершенствования сложных технологических комплексов, их контроля и испытания.

В первой главе проводится обзор датчиков линейных перемещений, анализ конструкций ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом для изучения систематических погрешностей ИИУС и анализ их источников. Наиболее распространенными датчиками являются (рисунок 1):

1) датчики накапливающего типа. Эти датчики поставляют информацию об измеряемой величине, изменяющейся в ограниченных пределах. Проблема определения истинного значения измеряемой величины решается электронными блоками, способными накапливать информацию. Примером таких датчиков являются датчики перемещений с использованием индуктивности. При сбоях в цепи питания таких датчиков возможна потеря информации;

2) датчики непосредственного считывания, параметры выходного сигнала которых полностью соответствуют измеряемой величине с определенной точностью. Такие датчики широко используются в установках различного назначения, не требующих постоянного контроля и настройки после отключения питания или при различных сбоях в работе. Например, магнитоиндуктивный датчик линейных перемещений LI700P0-Q25LM0-LIU5X3-H1151/1590600 (Turck) имеет следующие параметры: диапазон перемещений до 1000 мм, разрешение 0,1...1 мм, выходной сигнал и интерфейс 0...10 В, 4...20 мА. Особенности эксплуатации – высокая запыленность, температура ниже минус 20 °С.



Рисунок 1 – Типы датчиков линейных перемещений

Но одним из направлений развития измерительных устройств является использование информационных электрических машин. К ним относятся прежде всего электромагнитные фазовращатели (ЭМФ), назначение которых заключается в преобразовании угла поворота вала в фазу электрического сигнала. Они широко применяются в управлении закрылками самолета, рулем поворота, в аппаратуре программного управления, дистанционно-следающих системах, дальномерных устройствах локационных установок и гироскопической технике. ЭМФ нашли широкое применение в системах роботизации и системах автоматического управления.

Электромагнитный фазовращатель представляет собой электрическую машину, состоящую из статора и ротора, которые изготовлены из ферромагнитных материалов, снабженных зубцами и обмотками. Конструкция машины обеспечивает возможность поворота ротора, обеспечивая изменение взаимного положения обмоток статора и ротора (рисунок 2).

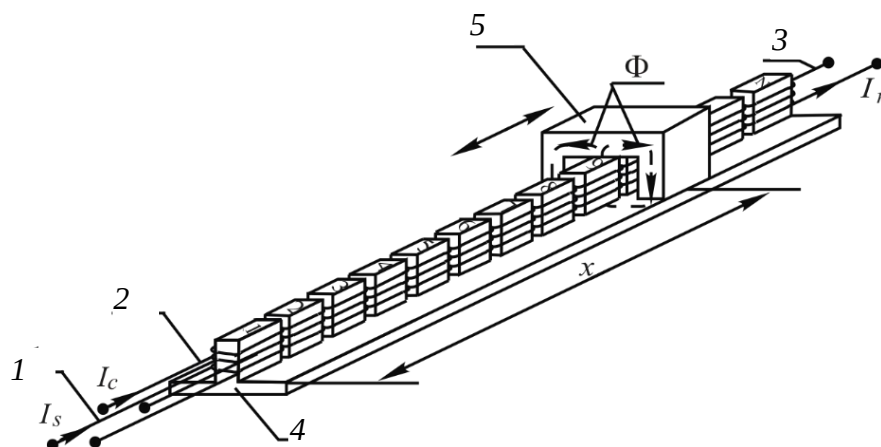


Рисунок 2 – Конструкция ЭМС с бегущим магнитным полем, на основании которой разработан линейный ЭМФ

Система состоит из информационной линейки, содержащей синусную обмотку 1, косинусную обмотку 2, равномерную обмотку 3, расположенные на магнитопроводе линейки 4. Магнитопровод информационной линейки имеет выступы, количество которых всегда кратно четырем зубцам, на которых расположены катушки обмоток. Нумерация зубцов показана на торцах зубцов. При отсутствии магнитного шунта 5 параметры магнитопровода не зависят от x , т.е. магнитопровод однороден по всей длине информационной линейки. Однородность магнитопровода нарушается введением шунта 5.

Достоинство ЭМФ заключается в хорошей разрешающей способности при устойчивости ЭМС к внешним влияющим факторам. При простоте конструкция ЭМФ обладают высокой надежностью по сравнению с другими электромагнитными системами.

Исходя из вышесказанного ЭМФ для измерения механических величин в ИИУС имеет преимущества при использовании в современных робототехнических системах и комплексах, так как обладает минимальной погрешностью, высокой износоустойчивостью и несложной аппаратной конструкцией.

Проведенные анализ ЭМС и исследования ЭМФ показали, что:

1) методы построения ЭМС на основе ЭМФ, как отдельных конструкций и структурных схем ИИУС, на данный момент не разработаны;

2) ЭМС на основе ЭМФ с разносторонними свойствами обладают несложной конструкцией и достаточно хорошей разрешающей способностью;

3) ЭМС на основе ЭМФ имеют высокую динамику и большую угловую скорость передвижения.

Таким образом, анализ существующих конструкций ЭМС показал, что создание ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с неоднородным распределенным магнитопроводом позволит улучшить метрологические характеристики ЭМП и оптимизировать систематические погрешности ИИУС динамических перемещений.

Во второй главе представлена скорректированная функция преобразования измерительной системы с датчиком линейных перемещений на основе ЭМФ для снижения систематической погрешности измерений ИИУС, а также улучшенный алгоритм функционирования измерительной системы линейных перемещений с неоднородным распределенным магнитопроводом.

Основным параметром любого элемента, входящего в измерительную систему, является функция преобразования, определяющая зависимость выходной величины – фазового сдвига напряжения с входной величиной – перемещением. Поскольку выходные напряжения пропорциональны токам при равенстве сопротивлений нагрузки синусной и косинусной обмоток, то выходной ток равен

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{вых}} = \underline{I}_k - j\underline{I}_c = \underline{E}_p \frac{j\omega \frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \left(\cos \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} - j \sin \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)}{(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 - \underline{Z}_{\text{р общ}} \left(\underline{Z}_{\text{с общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)} = \\ = \underline{E}_p \frac{j\omega \frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l}}{(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 - \underline{Z}_{\text{р общ}} \left(\underline{Z}_{\text{с общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)} e^{-j\varphi}, \\ \text{где } \varphi = \arctg \left(-\frac{\sin \left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)} \right) = -\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l}. \end{aligned}$$

Множитель в форме дроби обозначим через коэффициент $\underline{K}$, тогда выходной ток равен

$$\underline{I}_{\text{вых}} = \underline{K} e^{-j \left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)},$$

$$\text{где } \underline{K} = \underline{E}_p \frac{j\omega \frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l}}{(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 - \underline{Z}_{p \text{ общ}} \left(\underline{Z}_{c \text{ общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)}.$$

Фазовый сдвиг выходного напряжения относительно опорного напряжения прямо пропорционален измеряемому перемещению $x_{\text{ш}}$.

Рассмотрим уравнения для вычисления токов и напряжений на зажимах элементов несбалансированной ЭМС; выходной ток равен

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{вых}} = & \frac{-\underline{E}_p \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \left(\underline{Z}_{c \text{ общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right) \cos \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l}}{\left(j\omega \left(\left(\underline{Z}_{c \text{ общ}} - \underline{Z}_{k \text{ общ}} \right) \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} - j\omega \left(\frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)^2 \right) - \right.} + \\ & \underline{Z}_{p \text{ общ}} \left(-(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 \left(\underline{Z}_{k \text{ общ}} \sin^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} + \underline{Z}_{c \text{ общ}} \cos^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right) + \right. \\ & \left. \left. + \underline{Z}_{c \text{ общ}} \underline{Z}_{k \text{ общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right) \right) -} \\ & + \frac{\underline{E}_p \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} j \left(\underline{Z}_{k \text{ общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right) \sin \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l}}{\left(j\omega \left(\left(\underline{Z}_{c \text{ общ}} - \underline{Z}_{k \text{ общ}} \right) \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} - j\omega \left(\frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)^2 \right) - \right.} \\ & \underline{Z}_{p \text{ общ}} \left(-(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 \left(\underline{Z}_{k \text{ общ}} \sin^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} + \underline{Z}_{c \text{ общ}} \cos^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right) + \right. \\ & \left. \left. + \underline{Z}_{c \text{ общ}} \underline{Z}_{k \text{ общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right) \right) -} \end{aligned}$$

При двухфазном питании выходным током датчика является ток равномерной обмотки. При сбалансированности обмоток датчика выходной ток равен

$$\underline{I}_{\text{вых}} = E \frac{j\omega \frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l}}{(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_{-m} W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 - \underline{Z}_{p \text{ общ}} \left(\underline{Z}_{c \text{ общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} y_{-m} W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)} e^{-j\varphi},$$

$$\text{где } \varphi = \arctg \left(-\frac{\sin \left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)} \right) = -\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l}.$$

Множитель в форме дроби обозначим через коэффициент $\underline{K}$, тогда выходной ток равен

$$\underline{I}_{\text{вых}} = \underline{K} e^{-j\left(\frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l}\right)},$$

$$\text{где } \underline{K} = \underline{E}_p \frac{j\omega \frac{l}{\pi} y_m W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l}}{(j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} y_m W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 - \underline{Z}_{\text{р общ}} \left(\underline{Z}_{\text{с общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} y_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)}.$$

Уравнения выходного тока при двухфазном и однофазном питании совпадают, что указывает на отсутствие отличия в режиме работы датчика с точки зрения функционирования. Выбор схемы питания измерительной системы зависит от конкретных условий работы датчика и наличия других устройств. Если существует источник двухфазного, трехфазного или в общем случае n -фазного напряжения, датчик следует включать по схеме двухфазного или многофазного питания. При наличии однофазного источника синусоидального напряжения следует использовать однофазный режим работы.

На рисунке 3 представлена принципиальная конструкция фазового датчика линейных перемещений для ЭМФ ИИУС динамических перемещений. Работа ЭМФ основана на изменении электромагнитного взаимодействия обмоток при изменении положения неоднородности распределенного магнитопровода. В качестве элемента, вносящего неоднородность, используется магнитный шунт.



Рисунок 3 – Фазовый датчик линейных перемещений с ЭМФ

Полная длина информационной линейки равна длине зубцового деления, умноженного на количество зубцов. В отверстиях нижней и верхней частей есть обмотанный материал, число витков W_p одномерно на всех участках. В отверстиях статора намотана синусная и косинусная обмотки.

Число витков синусной и косинусной обмоток зависит от зубца статора и находится по формулам:

$$W_{ck} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right), \quad W_{kk} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right),$$

где W_{ck} – количество витков синусной обмотки на участке k ; W_{kk} – количество витков косинусной обмотки на участке k ; n – количество активных участков информационной линейки; W_m – максимальное количество витков обмотки, которое зависит от размеров паза и диаметра провода; k – номер активного участка.

Оптимальный режим работы датчика обеспечивается при использовании однофазного режима, так как только в этом режиме работы входное сопротивление ЭМФ постоянно и не зависит от положения магнитного шунта относительно информационной линейки, из этого следует, что функция преобразования, определяющая зависимость выходного тока от положения шунта относительно информационной линейки при невыполнении условия сбалансированности обмоток, будет выражаться следующим уравнением:

$$I_{\text{вых}} = \frac{\underline{E}_p \left(\underline{Z}_{\text{с общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} \right) \left(\underline{Z}_{\text{к общ}} + j\omega \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)}{\underline{Z}_{\text{р общ}} \left[j\omega \left(\left(\underline{Z}_{\text{с общ}} - \underline{Z}_{\text{к общ}} \right) \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} - j\omega \left(\frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)^2 \right) - \right. \\ \left. - (j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} \underline{y}_m W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 \left(\underline{Z}_{\text{к общ}} \sin^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} + \underline{Z}_{\text{с общ}} \cos^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right) + \right. \\ \left. + \underline{Z}_{\text{с общ}} \underline{Z}_{\text{к общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right. \\ \left. \left. - \underline{E}_p (j\omega)^2 \left(\frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \sin \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} \right)^2 \right] \right. \\ \left. - \underline{Z}_{\text{р общ}} \left[j\omega \left(\left(\underline{Z}_{\text{с общ}} - \underline{Z}_{\text{к общ}} \right) \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l} - j\omega \left(\frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right)^2 \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - (j\omega)^2 \left(\frac{l}{\pi} \underline{y}_m W_p W_m \sin \frac{\pi g}{l} \right)^2 \left(\underline{Z}_{\text{к общ}} \sin^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} + \underline{Z}_{\text{с общ}} \cos^2 \frac{2\pi x_{\text{ш}}}{l} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \underline{Z}_{\text{с общ}} \underline{Z}_{\text{к общ}} - j\omega \frac{l}{4\pi} \underline{y}_m W_m^2 \sin \frac{2\pi g}{l} \right] \right] .$$

Таким образом, исходя из вышеизложенных аналитических выражений была скорректирована функция преобразования измерительной системы, позволяющая до 4 % снизить систематические погрешности измерений ИИУС.

Следующим этапом является улучшение алгоритма функционирования ИИУС линейных перемещений за счет применения в нем скорректированной функции преобразования в блоках обработки результатов вычислений и определения зависимости показателей ИИС от измеряемого перемещения. Алгоритм представлен на рисунке 4, для его разработки была использована программная среда MatLab, обладающая мощными средствами графики и комплексной визуализации.

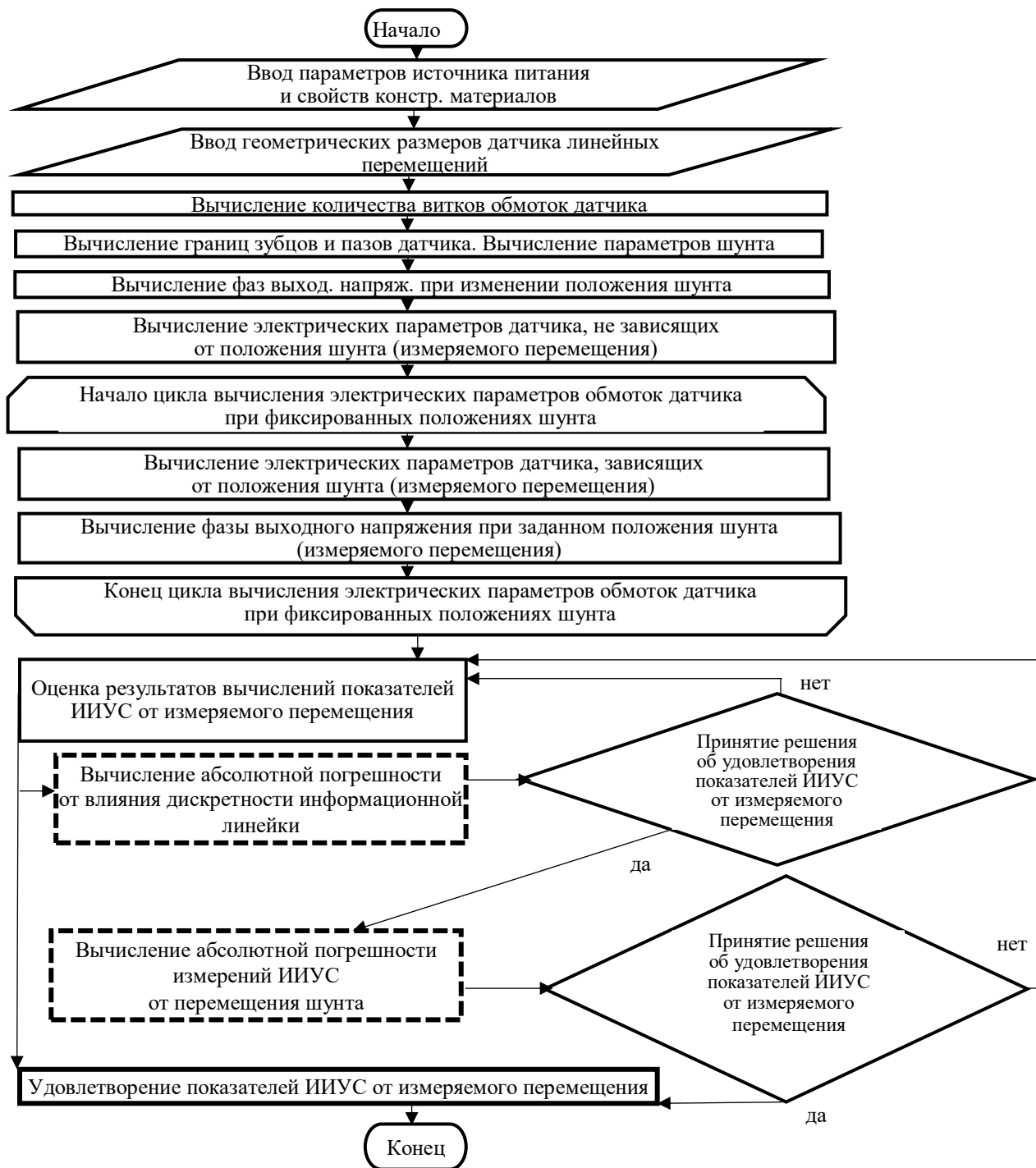


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма функционирования ИИС линейных перемещений

Улучшение алгоритма заключается в следующем. В алгоритм введены блоки вычисления абсолютной погрешности от влияния дискретности информационной линейки и измерения ИИУС от перемещения шунта. Обработка выходного сигнала представлена зависимостью фазы выходного тока от перемещения шунта с учетом установки «нуля». В качестве идеальной характеристики принята линейная зависимость. В соответствии с уравнением функции преобразования фаза выходного тока ИИУС пропорциональна значению перемещения шунта. Дискретное изменение перемещения шунта x дает ряд значений φ . После вычисления абсолютной погрешности строится зависимость абсолютной погрешности

ИИУС от перемещения шунта, определяются дисперсия, среднеквадратическое отклонение и основная приведенная погрешность.

Приведенная погрешность ИИУС определяется среднеквадратичным отклонением, отнесенным к диапазону измерений (в данном случае это одно полное перемещение шунта, равное длине информационной линейки).

Таким образом, улучшенный алгоритм функционирования ИИУС линейных перемещений позволяет в 1,5 раза точнее оценивать систематические погрешности измерений по осям многомерного ортогонального пространства путем дополнительного введения в алгоритм блоков обработки и вычисления абсолютной погрешности от влияния дискретности измерительной линейки.

В третьей главе представлена методика анализа систематической погрешности ИИУС линейных перемещений, позволяющая увеличить надежность роботизированных и автоматизированных систем.

Систематическая погрешность ИИУС прямолинейных перемещений на основе фазового ЭМП включает в себя две составляющие обусловленные:

- электрическими свойствами компонентов ИИУС;
- конструкционными свойствами ЭМП ИИУС.

К первой группе факторов относятся параметры режима работы источника питания, а именно неравенство коэффициентов усиления каналов синусной и косинусной обмоток и неточность фазовращательного синусоидного электрического напряжения. Ко второй группе влияющих факторов относятся:

- число зубьев преобразовательного элемента;
- минимальная погрешность при построении магнитного провода;
- дискретное равномерное число витков обмотки;
- неоднородность магнитопровода;
- неравенство сопротивлений цепей (несбалансированность) синусной и косинусной обмоток;
- отклонение реальной длины магнитного шунта от расчетного значения.

Найти степень влияния систематической погрешности линейных перемещений на неточность ИИС можно с помощью созданного алгоритма функционирования. Для этого применим методику анализа систематической погрешности ИИС линейных перемещений, учитывающую абсолютную погрешность измерений по осям многомерного ортогонального пространства (рисунок 5).

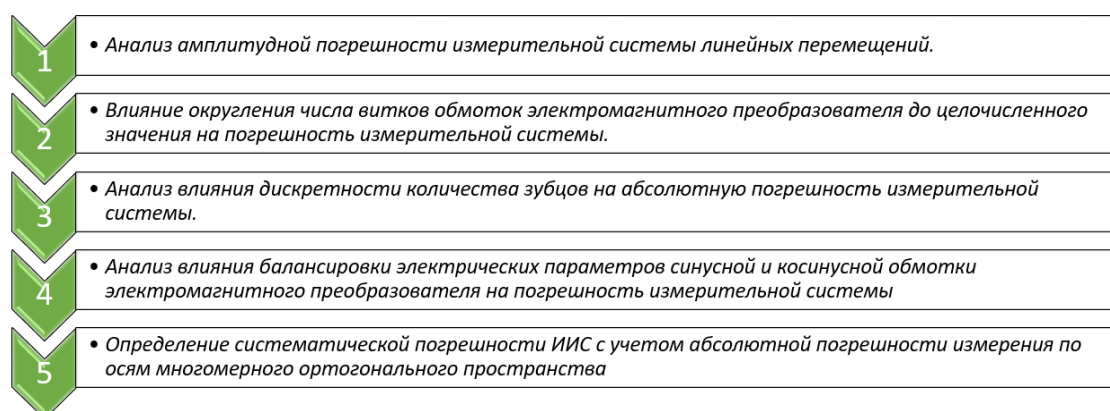


Рисунок 5 – Методика определения систематической погрешности ИИС, учитывающая абсолютную погрешность измерений по осям многомерного ортогонального пространства

Поясним функциональную значимость каждого пункта методики.

1. Анализ амплитудной погрешности измерительной системы линейных перемещений.

Суммарное напряжение, или напряжение на выходе сумматора, определяется уравнением

$$\begin{aligned}\underline{U}_{\Sigma} &= \underline{U}_c + \underline{U}'_s = \underline{K} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) \cdot (1 + 0,005) + \underline{K} \cdot j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) \cdot (1 - 0,005) = \\ &= \underline{K} \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) \right] + 0,005 \cdot \underline{K} \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) - j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right) \right] = \\ &= \underline{K} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right)} + 0,005 \cdot \underline{K} \cdot e^{-j \cdot \left(\frac{2\pi}{l} x_{\text{мп}}\right)}.\end{aligned}$$

Следовательно, выходное напряжение сумматора представляется суммой двух напряжений. Первая составляющая напряжения имеет амплитуду, равную амплитуде выходного напряжения при равенстве напряжений $\underline{U}'_s$ и $\underline{U}_c$. Это напряжение изменяет начальную фазу пропорционально измеряемому перемещению. Вектор этого напряжения на комплексной плоскости при увеличении измеряемого перемещения вращается против часовой стрелки на угол, пропорциональный перемещению. Вторая составляющая имеет амплитуду в 0,5 % предыдущей составляющей, но при увеличении измеряемого перемещения вектор этого напряжения поворачивается по часовой стрелке на угол, пропорциональный измеряемому перемещению.

В результате взаимодействия этих напряжений получаем абсолютную «амплитудную» погрешность ИИС. График зависимости абсолютной погрешности от перемещения передвигного магнитопровода представлен на рисунке 6.

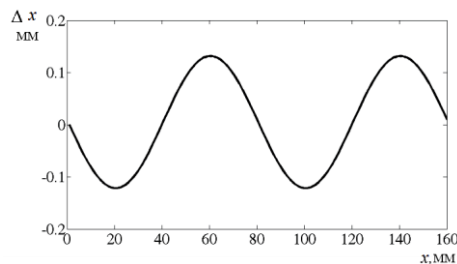


Рисунок 6 – График зависимости абсолютной погрешности от перемещения передвигного магнитопровода

2. Влияние округления числа витков обмоток электромагнитного преобразователя до целочисленного значения на погрешность измерительной системы.

Реальный электромагнитный преобразователь имеет три обмотки. Так называемая равномерная обмотка имеет произвольное количество витков и не оказывает влияния на погрешность измерений. Число витков синусной и косинусной обмоток вычисляется по формулам

$$W_s = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right) \quad \text{и} \quad W_c = W_m \cos\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right).$$

Расчетное количество витков в абсолютном большинстве случаев является числом дробным. Количество витков обмоток является всегда целым числом. Поэтому дробное число округляется до ближайшего целого значения. Это вынужденное округление приводит к появлению погрешности ИИС.

Определить расчетным путем степень влияния операции округления на погрешность ИИС практически невозможно. Однако в литературе по теории электромагнитных преобразователей приводятся приближенные формулы для вычисления максимальной ошибки по начальной фазе напряжения на выходе сумматора напряжений:

$$\Delta\varphi_m = \frac{\Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1}.$$

Рекомендуется количество зубцов информационной линейки выбирать кратным четырем. В этом случае оценку влияния округления количества витков достаточно провести на первой четверти зубцов. Очевидно то, что абсолютная погрешность измерительной системы, обусловленная округлением количества витков, носит периодический характер.

Представленная зависимость получена с помощью компьютерной модели измерительной системы. График подтверждает периодическую зависимость погрешности от измеряемого перемещения. Максимальное значение отклонения количества витков от расчетного значения составляет 0,5 витка. В соответствии с приведенной выше формулой абсолютная погрешность углового значения обратно пропорциональна максимальному значению количества витков. На рисунке 7 представлен график абсолютной погрешности при максимальном значении количества витков $W_m = 100$.

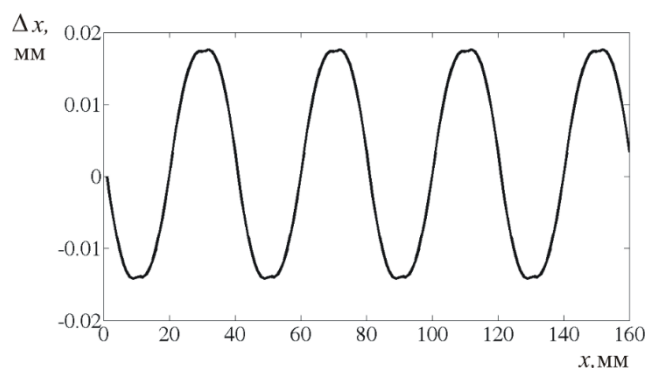


Рисунок 7 – График абсолютной погрешности при максимальном значении количества витков

Максимальное значение абсолютной погрешности составляет 0,015 мм. При увеличении максимального значения количества до $W_m = 200$ уменьшается абсолютная погрешность до значения 0,0035 мм. График абсолютной погрешности измерительной системы с электромагнитным преобразователем, где обмотка рассчитана из условия $W_m = 200$, представлен на рисунке 8. Характер графика периодический.

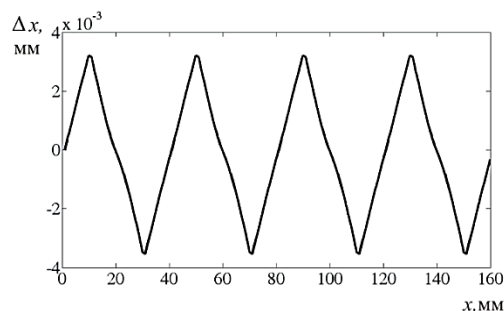


Рисунок 8 – График абсолютной погрешности ИИС с электромагнитным преобразователем, где обмотка рассчитана из условия $W_m = 200$

3. Анализ влияния дискретности количества зубцов на абсолютную погрешность измерительной системы.

Амплитуда выходного напряжения ИИС зависит от векторной суммы. Приращение удельного магнитной проводимости в зоне расположения передвижного магнитопровода вычисляется следующим образом:

$$\underline{Y}_{0\text{мр}} = \underline{\mu} \cdot \mu_0 \cdot h \cdot \left[\frac{l_{\text{ср}} - l_{\text{ст}} + 2 \cdot \delta}{\frac{\underline{\mu} \cdot l_{\text{ср}}^2}{(\underline{\mu} - 1)} + \underline{\mu} \cdot 2 \cdot \delta \cdot (l_{\text{ср}} - l_{\text{ст}}) - l_{\text{ср}} \cdot l_{\text{ст}}} \right].$$

Именно эта составляющая удельной магнитной проводимости обеспечивает выходные напряжения синусной и косинусной обмоток, амплитуды которых зависят от места расположения передвижного магнитопровода на информационной линейке. Приращение ЭДС обмоток в пределах одного зубцового деления пропорционально лишь приращению магнитного потока этого зубцового деления и зависит от количества витков обмоток, расположенных в пределах этого участка. Количество витков постоянно в пределах участка.

Изменение ЭДС обмоток по линейному закону является причиной погрешности измерительной системы.

При конкретном количестве зубцов ИИС имеет абсолютную погрешность, изменяющуюся при перемещении шунта вдоль информационной линейки. График этой функции представлен на рисунке 9. Максимальное значение абсолютной погрешности $1 \cdot 10^{-3}$ мм будет при максимальном перемещении в 160 мм.

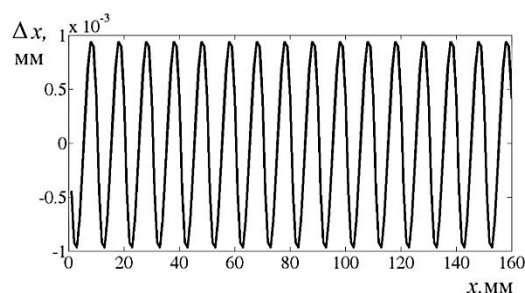


Рисунок 9 – График абсолютной погрешности, изменяющейся при перемещении шунта вдоль информационной линейки

4. Анализ влияния балансировки электрических параметров синусной и косинусной обмоток электромагнитного преобразователя на погрешность измерительной системы.

Балансировка обмоток электромагнитного преобразователя производится с целью достижения равенства активных и реактивных сопротивлений.

Влияние неравенства индуктивных и резистивных сопротивлений обмоток на погрешность измерительной системы исследовалось с помощью компьютерной модели. Для оценки степени влияния разбаланса в программе было задано превышение индуктивного сопротивления синусной обмотки над индуктивностью косинусной обмотки в 1 % от номинальной величины в сторону увеличения. График зависимости абсолютной погрешности измерительной системы для данной степени разбаланса индуктивных сопротивлений от измеряемого перемещения представлен на рисунке 10. Максимальная погрешность составляет 0,013 мм.

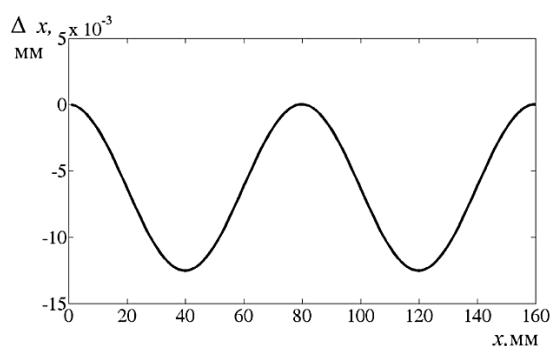


Рисунок 10 – График зависимости абсолютной погрешности измерительной системы для данной степени разбаланса индуктивных сопротивлений от измеряемого перемещения

Источником абсолютной погрешности системы является неравенство активных сопротивлений обмоток. Аналогичным способом в компьютерной модели было задано неравенство активных сопротивлений синусной и косинусной обмоток в 1 %. Результат эксперимента представлен на рисунке 11. Максимальная абсолютная погрешность в этом случае составляет 0,15 мм при максимальном перемещении в 160 мм.

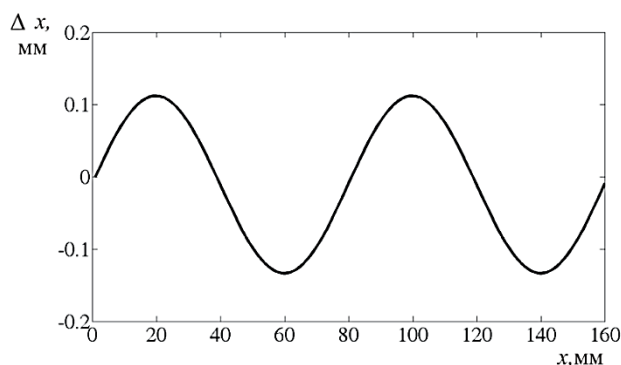


Рисунок 11 – Максимальная абсолютная погрешность при неравенстве активных сопротивлений синусной и косинусной обмоток в 1 %

Степень влияния неравенства индуктивных и активных сопротивлений обмоток зависит от соотношения этих параметров. В рассматриваемом случае небаланс активных сопротивлений в 1 % приводит к большему значению абсолютной погрешности. Балансировку сопротивлений в любом случае следует производить при отсутствии передвижного магнитопровода на информационной линейке. Таким образом, методика анализа систематической погрешности ИИУС линейных перемещений позволяет увеличить надежность роботизированных и автоматизированных систем на 2 %.

В четвертой главе представлена структурная схема ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с неоднородным распределенным магнитопроводом ЭМФ для улучшения метрологических характеристики ИИУС динамических перемещений и оптимизации систематической погрешности ИИУС динамических перемещений.

Структурная схема ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом представлена на рисунке 12.

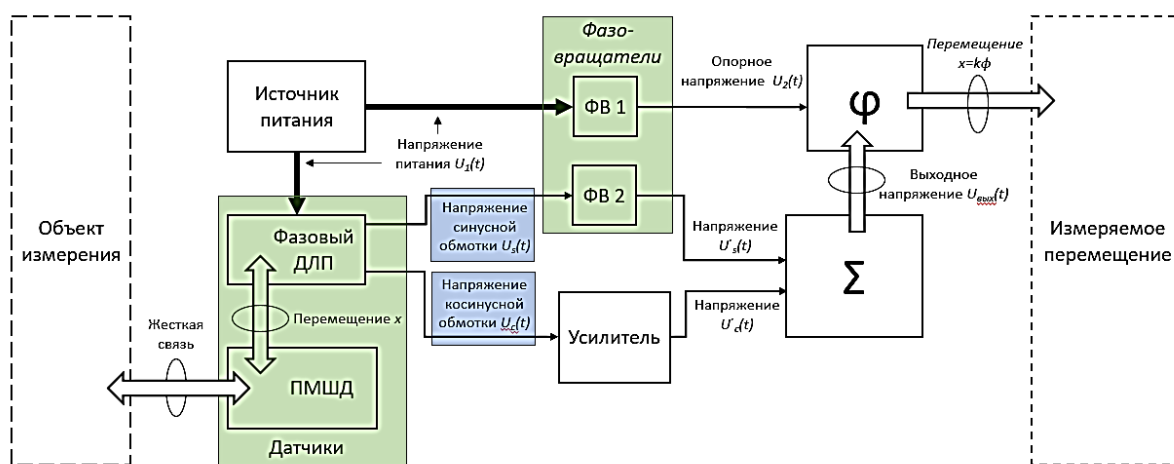


Рисунок 12 – Структурная схема ИИУС динамических перемещений: ПМШД – перемещение магнитного шунта датчика; ДЛП – датчик линейных перемещений; ФВ1 – электронный фазовращатель; ФВ2 – электронный фазовращатель опорного напряжения; Σ – сумматор; φ – фазометр

Положение передвижного магнитопровода на информационной линейке определяется координатой x . На выходе ЭМП получаем два напряжения. На зажимах синусной обмотки получим синусное напряжение

$u_s(t) = U_m \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \cdot \sin(\omega t)$. На зажимах косинусной обмотки получим

напряжение $u_c(t) = U_m \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \cdot \sin(\omega t)$. Напряжение синусной обмотки по-

дается на вход фазовращателя ФВ1. На выходе фазовращателя получим напря-

жение, амплитуда которого равна амплитуде синусного напряжения, но его начальная фаза отстает на 90° $u'_s(t) = U_m \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$. Напряжения

$u'_s(t)$ и $u_c(t)$ поданы на вход сумматора Σ , на выходе которого получим напряжение $u_\Sigma(t)$ с постоянной амплитудой и начальной фазой, изменяющейся пропорционально измеряемому перемещению x . Фазометр измеряет фазовый сдвиг напряжения $u_\Sigma(t)$ относительно опорного напряжения $u_0(t)$, которое является выходным напряжением фазовращателя ФВ2. Фазовращатель ФВ2, который получает питание от источника питания, определяет начало отсчета перемещения. С помощью этого фазометра осуществляется установка «нуля». На выходе фазометра получаем фазовый сдвиг $\varphi = k \cdot x$, проградуированный в измеряемом перемещении. Предложенная схема реализована с помощью унифицированного электронного преобразователя, предназначенного для работы в роботизированных системах, и выполнена на базе микроконтроллера PIC18F2523 фирмы Microchip. В результате была получена ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений с ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом, которая позволяет улучшить метрологические характеристики ИИУС динамических перемещений на 5 %.

На основе изложенных принципов была разработана новая конструкция датчика линейных перемещений с ЭМФ (рисунок 13), позволяющая улучшить устойчивость к внешним воздействующим факторам.

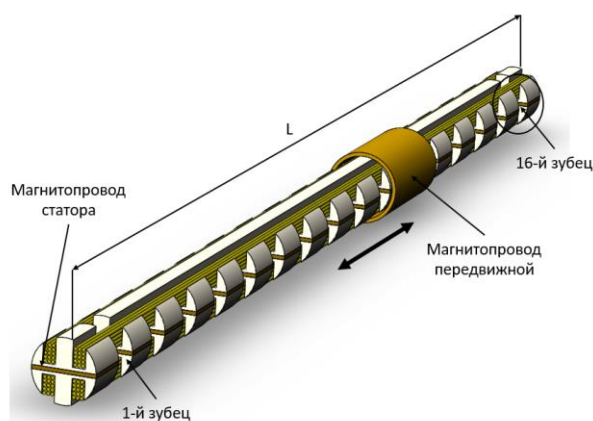


Рисунок 13 – Конструкция датчика линейных перемещений с ЭМФ

Конструкция датчика обладает формой цилиндра в состав которой входит три компонента. Каркасы, расположенные сверху и снизу, имеют разрезанную вдоль оси линию, которая состоит из немагнитного компонента, все это помещено в полое кольцо из железо-магнитного компонента – динамичного магнитного провода.

В приложении представлены: исходный код текста программы вычисления коэффициентов взаимного влияния факторов, реализованный на языке высокого уровня программирования C#, имитационная модель ИИС линейных перемещений, а также результаты вычислительного и натурального экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложено использование конструкций ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом для изучения систематических погрешностей ИИУС.

2. Выявлено влияние источников систематической погрешности измерения ЭМФ с неоднородным распределенным магнитопроводом на датчики линейных перемещений в части малой дискретизации информационной линейки и низкой стабильности характеристик в условиях изменения внешних влияющих факторов.

3. Скорректирована функция преобразования системы на основе неоднородного распределенного магнитопровода с ЭМФ, позволяющая снизить систематическую погрешность ИИУС до 4 % за счет учета в электромагнитных преобразователях неоднородного распределенного магнитопровода, применяемая в датчиковой аппаратуре систем роботизации и автоматизированного управления.

4. Разработан улучшенный алгоритм функционирования измерительной системы линейных перемещений, позволяющий в 1,5 раза точнее оценивать систематические погрешности измерений по осям многомерного ортогонального пространства, отличающийся введением блоков вычисления абсолютной погрешности от влияния дискретности информационной линейки и измерения ИИУС от перемещения шунта, при проектировании ИИУС измерения механических перемещений (**специальность 05.11.16, п. 3**).

5. Создана методика анализа систематической погрешности измерений, позволяющая повысить надежность роботизированных и автоматизированных систем на 2 % за счет учета взаимного влияния дестабилизирующих факторов. Методика базируется на использовании разложения абсолютных погрешностей по осям многомерного ортогонального пространства.

6. Разработана структурная схема ИИУС динамических перемещений на основе датчика перемещений в виде электромагнитного фазовращателя с неоднородным распределенным магнитопроводом с улучшением метрологических характеристик до 5 % за счет учета синусной и косинусной обмоток (**специальность 05.11.16, п. 6**).

7. Внедрены результаты исследований в виде методики и ИИУС в процесс создания датчиковой аппаратуры систем роботизации и автоматизированного управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ

1. Горячев, В. Я. Электрическая схема замещения информационно-измерительных систем линейных перемещений на основе фазового датчика / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1. – С. 5–11. – doi:10.21685/2307-5538-2019-1-1

2. Методика анализа систематической погрешности информационно-измерительной системы перемещений на основе датчика линейных перемещений для электроэнергетических систем / Т. Ю. Бростилова, В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев, А. А. Тихомирова, О. К. Абдирашев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4. – С. 21–33. – doi:10.21685/2307-5538-2019-4-3

3. Абдирашев, О. К. Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя / О. К. Абдирашев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 90–100.

В базе Scopus

4. Goryachev, V. Linear measuring phase shift module / V. Goryachev, S. Kislyakov, D. Nefediev, O. Abdirashev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 2019. – doi:10.1109/FarEastCon.2019.8934786

5. Влияние спектрального состава напряжения генератора на погрешность информационно-измерительной системы линейных перемещений с фазовым датчиком / В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев, С. А. Бростилов, О. К. Абдирашев, А. А. Трофимов, Ю. А. Шатова // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020») : материалы XII Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – С. 222–227. – ISBN 978-5-907262-56-0.

6. Горячев, В. Я. Параметры лобовых соединений обмоток фазового датчика линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS : сборник статей XXVI Международной научно-практической конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 102–104. – ISBN 978-5-907135-21-5.

Публикации в других изданиях

7. Блок-схема и настройка ИИС крутящих моментов / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, С. В. Кисляков, О. К. Абдирашев, Т. Ю. Бростилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 5–7. – ISSN 2220-6418.

8. Горячев, В. Я. Фазовый датчик линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев, Т. Ю. Бростилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 7–9. – ISSN 2220-6418.

9. Горячев, В. Я. Информационно-измерительная система линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев, Т. Ю. Бростилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 9–11. – ISSN 2220-6418.

10. Горячев, В. Я. Индуктивные параметры фазовых датчиков линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // Традиции и инновации в современной науке : материалы XXXII международной научно-практической конференции. – Москва : Олимп, 2018. – Т. 65. – С. 66–68. – ISBN 978-5-6040640-1-6.

11. Датчики механических величин робототехнических комплексов на базе фазовращателей с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, Д. С. Ергалиев, Х. Молдамурат, О. К. Абдирашев, С. Б. Исмаилов // Вестник технических наук. – 2018. – № 2. – С. 32–46.

12. Горячев, В. Я. Электромагнитная система фазового датчика линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении («СВЕТ-2018») : материалы Международной научно-технической конференции с элементами научной молодежной школы, посвященной 20-летию ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение» / под редакцией Т. И. Мурашкиной. – Пенза, 2018. – С. 204–211.

13. Goryachev, V. Electrical parameters of phase sensors linear displacement / V. Goryachev, A. Zhakupova, D. Kalmanova, O. Abdirashev // Вестник государственного университета имени Шакарима. – 2019. – № 3(87). – С. 17–20. – ISSN 1607-2774.

14. Исследование аппаратных интерфейсов мехатронных устройств полезной нагрузки спутника связи КУ-диапазона / О. К. Абдирашев, А. Б. Куанханова, Д. М. Калманова, Г. А. Ануар, Д. С. Ергалиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2021. – Т. 1. – С. 199–204. – ISSN 2220-6418.

15. Разработка программного обеспечения для предварительного расчета системы энергоснабжения космического аппарата / О. К. Абдирашев, А. Б. Сыздыков, Ж. Г. Омаров, Б. Н. Оспанбеков, Г. А. Ануар, Д. С. Ергалиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2021. – Т. 1. – С. 204–207. – ISSN 2220-6418.

16. Абдирашев, О. К. Измерительные системы контроля перемещений электронных систем / О. К. Абдирашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2021. – Т. 2. – С. 47–49. – ISSN 2220-6418.

17. Удаление космического мусора с геостационарной орбиты / О. К. Абдирашев, Б. А. Мустафа, А. М. Искендинова, Г. А. Ануар, Д. С. Ергалиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2021. – Т. 2. – С. 115–118. – ISSN 2220-6418.

Научное издание

Абдирашев Омирзак Коптилеуулы

СНИЖЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Специальность 2.2.11 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (технические науки)

Редактор *А. Г. Темникова*
Технический редактор *Ю. В. Анурова*
Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Распоряжение № 71/208 от 30.07.2021

Подписано в печать 30.07.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Заказ № 335. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru