

М 419 107

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

МОСТОВОЙ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 621.3.079

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ДАТЧИКОВ СО СИЛОННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ НОВОГО
МАГНИТОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА КАК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Специальность 05.13.05—"Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-1984

Работа выполнена в Научно-исследовательском и конструкторском институте испытательных машин, приборов и средств измерения масс.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент МАМЕДОВ Ф.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ОСОКИН Ю.А.
кандидат технических наук,
с.н.с. ШИШКИНСКИЙ В.И.

Ведущее предприятия - НИИ Нефтехимавтомат, г. Сумгаит

Защита диссертации состоится "____" _____ 1984г. в
"____" часов на заседании специализированного совета
К 053.15.06 "Автоматические приводы и системы управления"
в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская
ул., д.5, МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Вам отзвмы в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба выслать по указанному адресу.

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

Автореферат разосл

УЧЕН
СПЕЦИАЛИЗ
К.7

Заказ 363

Л - 82863

Типография МВТУ. 107

М 418 102

Актуальность работы. В решениях XXVI съезда КПСС подчеркивается, что одним из важнейших направлений в работе по повышению производительности труда и ускорению научно-технического прогресса в отраслях народного хозяйства является комплексная механизация и автоматизация производства на основе широкого применения автоматизированных и робототехнических комплексов.

Важным элементом таких комплексов становятся промышленные объекты типа подъемных кранов, прокатных станов, металлорежущих станков и других устройств, деформация станин которых играет существенную роль в формировании точности выполнения заданного технологического процесса.

В последние десятилетия все шире начинают прибегать к различного рода датчикам, располагаемым на корпусах силовых устройств вышеуказанного типа, которые позволяют осуществлять контроль и управление, как промышленными объектами, так и участками комплексов с учетом силовых факторов.

В качестве датчиков находят применение тензорезисторные, вибрационно-частотные и другие. Однако, перспективными становятся магнитоупругие датчики со сплошным магнитопроводом, если удачно выбран его ферромагнитный материал. Это объясняется высокой жесткостью магнитоупругого датчика, его способностью выдерживать 2-х, 3-х кратные механические перегрузки, малой осадкой, низким механическим гистерезисом и другими эксплуатационными и метрологическими свойствами. Простота схем включения, высокая эксплуатационная надежность становятся решающими факторами, которые определяют возможность рекомендовать датчики на основе магнитоупругих преобразователей (МУП) в качестве элементов систем управления по силовому параметру.

Одна из задач, которую приходится решать при проектировании указанных систем управления связана с необходимостью установления рациональных параметров датчиков. Но в настоящее время в технической литературе отсутствуют необходимые сведения по целому ряду вопросов, связанных с проектированием сплошных магнитопроводов МУП.

В связи с этим настоящая работа, посвященная разработке инженерных методик расчета конкретных видов датчиков на основе



МУП – полых цилиндрических преобразователей как элементов систем управления вышеуказанными промышленными объектами, является актуальной.

В ней последовательно раскрываются закономерности формирования указанного вида конструкций, соотношения, которые следует применять при расчетах ступеней преобразования магнитоупругого преобразователя со сплошным магнитопроводом повышенных метрологических и технологических показателей с расширенными функциональными возможностями для проектирования силоизмерительных датчиков как элементов систем управления промышленными объектами.

Цель работы. Целью работы является разработка и исследование силоизмерительных датчиков на базе МУП с тонкостенными полыми цилиндрическими магнитопроводами, расширенными функциональными возможностями, обладающих повышенными метрологическими и технологическими показателями для систем управления промышленными объектами в виде силовых устройств.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался аппарат теории электромагнитного поля и электрических цепей для полых цилиндрической конструкции МУП силоизмерительного датчика, оснащенного двухсторонней обмоткой возбуждения, а также аппарат теории дифференциальных уравнений с частными производными и линейных дифференциальных уравнений. Основные теоретические результаты сопоставлялись с результатами экспериментов, которые проводились в лабораторных и промышленных условиях.

Научная новизна. В диссертации реализован подход к проектированию магнитоупругих преобразователей силоизмерительных датчиков, основанный на анализе применяемых материалов, конструкций и позволивший с позиций теории электромагнитного поля получить следующие результаты, отличающиеся новизной:

1. Выбор нового магнитоупругого материала для сплошного магнитопровода.
2. Конструкции с повышенным использованием активной поверхности сплошного магнитопровода по магнитному потоку.
3. Конкретизация общего вида решения дифференциального

уравнения для выбранной конструкции преобразователя с целью определения электромагнитных параметров в его произвольном сечении.

4. Математическая модель, позволившая получить рабочую характеристику и передаточную функцию МУП по напряжению питания в режимах холостого хода и нагрузочном. Экспериментальное определение изменения относительной проницаемости материала сплошного магнитопровода от силы с учетом поверхностного эффекта, обусловленного вихревыми токами.

5. Установление частотного диапазона напряжения питания, оптимального с точки зрения повышения чувствительности канала сигнала по фактору силы в системе управления объектом.

6. Экспериментальное определение изменения относительной магнитной проницаемости материала сплошного магнитопровода от температуры с учетом поверхностного эффекта.

Практическая ценность. Разработанная инженерная методика расчета датчика на базе МУП со сплошным магнитопроводом в виде полого цилиндра с двухсторонними обмотками возбуждения позволила создать системы управления промышленными объектами по фактору силы для частот питания до 5 кГц с этим элементом.

Предложенный новый магнитоупругий материал существенно снизил гистерезисную погрешность и расширил функциональные возможности МУП.

Повышенное использование активной поверхности сплошного магнитопровода по магнитному потоку позволило увеличить чувствительность датчика.

Предложенный обобщенный метод определения электромагнитных параметров преобразователя со сплошным магнитопроводом с позиций теории электромагнитного поля позволил установить аналитические выражения информационных характеристик силоизмерительного датчика.

Перспективным является применение развиваемых в данной работе методов и подходов к новым конструкциям магнитоупругих преобразователей со сплошным магнитопроводом, так как теоретико-полевые методы в современной форме (без необходимости их

адаптации) затруднены в их применении для анализа произвольной конструкции преобразователя, являющегося основой рассматриваемого датчика.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований использовались при опытном и последующем серийном внедрении магнитоупругих преобразователей во Всесоюзном конструкторско-технологическом институте ВКТИмонтажстроймеханизация для систем безопасности по защите кранов МКАС-10, МКТС-100, МКТ-100 от перегрузок и опрокидывания.

Экономический эффект за четыре года применения серийно выпускаемых Московским ремонтно-механическим заводом Минмонтажспецстроя СССР датчиков (1979-1983г.г.) составил 100 тыс.рублей.

Результаты исследований были использованы также при макетировании и опытном внедрении датчиков на базе МУП для регулирования силы резания на фрезерном станке с числовым программным управлением модели 665 разработки Экспериментального института металлорежущих станков.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканском семинаре УССР "Магнитоупругие силоизмерители в промышленных системах автоматики" (1978г., г.Киев), на Всесоюзном совещании "Автоматизация процессов взвешивания и дозирования" (1981г., г.Одесса), на Всесоюзной конференции "Применение методов и средств тензометрии для измерения механических параметров" (1982г., г.Пенза).

Публикации. По результатам выполненных исследований было опубликовано 12 научных работ, в том числе авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 100 наименований, приложений. Содержит 110 страниц основного машинописного текста, 36 рисунков, 9 таблиц.

Во введении диссертации обоснованы актуальность проблемы, дана общая характеристика и направленность работ.

Глава I. Обзор цилиндрических конструкций магнитоупругих.

преобразователей со сплошным магнитопроводом и методов их проектирования.

В главе дается обзор цилиндрических магнитоупругих преобразователей со сплошным магнитопроводом, их особенностей, преимуществ и недостатков. Отмечается, что существенно важные вопросы метрологической оценки механической ступени магнитоупругого преобразователя, учета технологических и эксплуатационных свойств применяемых сплошных ферромагнетиков, возможностей цилиндрических конструкций и неравномерности распределения по длине и глубине магнитопровода магнитных параметров из-за поверхностного эффекта не нашли достаточного отражения при проектировании магнитоупругих преобразователей этого и других видов. Однако учет именно этих факторов позволил бы разработать инженерную методику проектирования МУП повышенных метрологических и технологических показателей, как элемента системы управления силовыми устройствами. Это предполагает получение передаточной функции электромагнитного устройства автоматики со сплошным магнитопроводом с позиций теории электромагнитного поля, а не на основе теории электрических и магнитных цепей, как сложилось на практике.

Для проектирования датчиков повышенных метрологических и технологических показателей необходимо определить технические требования к сплошному ферромагнетику электромагнитного устройства, являющегося измерительным органом силового параметра, к конструкции магнитоупругого преобразователя в части использования активной поверхности сплошного магнитопровода по магнитному потоку. Распространение в системах управления промышленными объектами силовых измерительных датчиков со сплошным магнитопроводом на базе высоконадежных, дешевых в изготовлении и эксплуатации полых цилиндрических МУП, отсутствие аналитических выражений информационных характеристик последних, а также отсутствие удовлетворительных методик их теоретического определения делает актуальным разработку обобщенных методов их расчета для целей проектирования.

Настоящая работа посвящена разработке теории проектирования именно этих преобразователей, обладающих осевой симмет-

рией, что позволило применить метод расчета электромагнитных параметров, заключающийся в решении уравнений электромагнитного поля, локализованного конструкцией преобразователя.

Для достижения этой цели было необходимо:

- исследовать возможность совершенствования конструкции МУП определенного типа (цилиндрические и полоцилиндрические) и методов их расчета;
- выявить возможности повышения метрологических и технологических характеристик магнитоупругих преобразователей силоизмерительных датчиков, выбором материала, конструкции и другое;
- разработать методики инженерного расчета электромагнитных явлений в сплошном магнитопроводе;
- проанализировать существующие методы расчета магнитной системы МУП этого вида, учитывающие недостаточно полно сложную картину явлений в сплошном полом цилиндрическом магнитопроводе;
- разработать математическую модель МУП этого вида;
- определить электромагнитные параметры МУП силоизмерительного датчика со сплошным полом цилиндрическим магнитопроводом как обобщенные переменные электромагнитного устройства автоматики;
- определить и исследовать для целей рационального проектирования информационные характеристики преобразователя в функции электромагнитных параметров. Это передаточная функция и рабочая характеристика МУП;
- исследовать дополнительные погрешности МУП - частотную и температурную и пути снижения этих погрешностей для расширения функциональных возможностей преобразователя;
- разработать инженерную методику проектирования МУП силоизмерительных датчиков;
- осуществить опытное и последующее серийное внедрение датчиков силы на базе разработанных МУП в ряд отраслей промышленности.

Глава 2. Обобщенный метод расчета электромагнитных параметров МУП со сплошным магнитопроводом.

В главе рассмотрен обобщенный метод расчета электромаг-

нитных параметров полого цилиндрического МУП со сплошным магнитопроводом, намагничиваемом с обеих боковых поверхностей — внешней и внутренней плотно прилегающими коаксиальными катушками, армированными с торцов кольцевыми выступами, выполненными заодно целое с магнитопроводом, а с соответствующих боковых сторон ненагружаемыми цилиндрическими магнитопроводами. Определено электромагнитное поле преобразователя в цилиндрической системе координат. Найдена напряженность магнитного поля в поперечной плоскости симметрии сплошного магнитопровода преобразователя с помощью нового способа расчета этого поля. Этот способ заключается в том, что определяется плоскость, где можно пренебречь всеми составляющими напряженности, кроме составляющей, перпендикулярной этой плоскости (наш случай — это плоскость поперечной симметрии преобразователя $z=0$) и зависящей от круговой координаты r в этой плоскости. При этом для плоскости поперечной симметрии преобразователя $z=0$ сохраняется только составляющая $H_{z=0}$. Определение электромагнитного поля в общем виде относительно этой составляющей произведено через уравнение Бесселя, решение которого записано в виде линейной комбинации функций Бесселя нулевого порядка. Далее, учитывая, что при распространении электромагнитного поля в данных конструкциях выполняется неравенство $r \cdot \sqrt{\omega \gamma \mu_0} > 10$ цилиндрическая поверхность заменена плоскостью, что позволило уравнение поля записать в виде:

$$\frac{d^2 H_{z=0}}{dr^2} = j\omega \gamma \mu_0 H_{z=0} \quad (I)$$

где ω — угловая частота тока возбуждения, γ — удельная электропроводимость материала магнитопровода, μ — относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода, μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Для удобства расчета применен традиционный прием введения переменных, имеющих ограниченное изменение в пределах глубины проникновения электромагнитной волны в сплошной ферромагнетик.

При определении постоянных интегрирования решения уравнения (I) использован закон полного тока в зоне продольного сечения бесконечно близкого к поперечной плоскости симметрии преобразователя, а также принцип непрерывности магнитного потока в плоскости поперечной симметрии последнего.

Затем определяется напряженность магнитного поля на каждой из боковых поверхностей полого цилиндра — внешней и внутренней. Для этого теоретически исследована элементарная трубка магнитного потока в сплошном, нагружаемом силовым параметром, магнитопроводе.

Условно выделенная элементарная трубка магнитного потока в магнитопроводе позволила установить дифференциальные соотношения между векторами поля $H_{z=0}$ и $H_{r'=0}$. Эти соотношения при необходимом условии их выполнения также и в плоскости симметрии преобразователя приводят с помощью ряда известных приемов и формул к выражению напряженности магнитного поля на боковых поверхностях через координату Z и постоянные интегрирования:

$$H_{r'=0} = \frac{I_1 W_1}{4h} \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{Z'}{D}\right)^2} - \frac{Z'}{D}}{\rho D \sqrt{1 + \left(\frac{Z'}{D}\right)^2}} \quad (2)$$

где $D = \frac{2}{3} \left(\frac{2\mu}{\rho} + h \right) \left(\frac{\mu}{\rho} + h \right) \frac{\rho}{\mu}$, $2h$ — высота намотки, $\rho = \sqrt{j\omega\mu\mu_0}$, I_1 — ток возбуждения, W_1 — число витков обмотки возбуждения. С учетом полученных выражений напряженностей магнитного поля в плоскости симметрии $H_{z=0}$ и на боковых поверхностях $H_{r'=0}$ определен магнитный поток в произвольном сечении магнитопровода.

$$\Phi_{z'=0} = \pi R_2 \mu \mu_0 \cdot \frac{I_1 W_1}{2h\rho} \left[\sqrt{\left(\frac{Z'}{D}\right)^2 + 1} - \frac{Z'}{D} \right] \quad (3)$$

Для определения постоянных интегрирования решалось поле в воздушном промежутке МУП и использовались граничные условия в конструкции преобразователя. Выражение (3) позволило определить информационные характеристики МУП.

Глава 3. Информационные характеристики преобразователя.

В главе определены аналитические выражения информационных характеристик преобразователя. Для этого определена выходная э.д.с. преобразователя при отсутствии усилия P , т.е. передаточная функция МУП по напряжению питания. Это осуществлено путем перехода от потока в произвольном сечении магнитопровода (3) к выходной э.д.с. по закону электромагнитной индукции. Магнитный поток, определенный аналитически в главе II, выражен через ток возбуждения. Выразив последний через напряжение питания, данные цепи возбуждения, нашли выражение выходной э.д.с. через напряжение питания и передаточную функцию преобразователя, включающую в свое выражение электромагнитные параметры МУП. После чего найдено аналитическое выражение изменения напряжения при изменении магнитной проницаемости от измеряемого усилия:

$$\Delta U_2 = m_1 m_2 \frac{\Delta \mu}{2 \mu_H} U_1 \quad (4)$$

$$\text{где } m_1 = \frac{w_2' w_1 \pi R_2 K_1}{2h} \sqrt{\frac{\omega \mu_H \mu_0}{\gamma}}; \quad m_2 = \frac{1 - \frac{r m_2 \omega + 2 m_2^2 \omega^2}{r^2 + 2 r m_2 \omega + 2 m_2^2 \omega^2}}{\sqrt{r^2 + 2 r m_2 \omega + 2 m_2^2 \omega^2}}$$

$$m_2 = [R_2 w_1^2 + R_1 w_2^2] \frac{\pi}{4h} \sqrt{\frac{\mu_H \mu_0}{\omega \gamma}} \cdot \sin \frac{\pi}{4}$$

μ_H — начальная магнитная проницаемость, U_1 — напряжение питания, R_2 — наружный радиус полого цилиндра, w_2' — число витков измерительной обмотки, $K_1 = 1 + \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{R_1}{R_2}$, R_1 — внутренний радиус полого цилиндра, r — суммарное омическое сопротивление обмоток возбуждения.

После экспериментального определения зависимости $\Delta \mu = k \cdot P$ и ее подстановки в (4) получено выражение изменения выходного напряжения от измеряемого усилия, т.е. рабочая характеристика датчика с МУП. Рабочая характеристика согласно выражению (4)

может быть получена с точностью не хуже 10% к экспериментальной

Полученная в работе передаточная функция позволила определить частотные характеристики преобразователя при различных размерах и следовательно, значениях электромагнитных параметров. Найдено аналитическое выражение оптимальной в смысле чувствительности частоты питающего напряжения от электромагнитных параметров. Определена возможность выбора частоты напряжения питания от омического сопротивления цепи питания и электромагнитного параметра $m = \frac{\pi}{4} [R_2 W_1^2 + R_1 W_2^2] \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\gamma}} \cdot \sin \frac{\pi}{4}$. Последний необходимо определять на стадии предварительного проектирования.

Установлены с учетом нагрузочного сопротивления выражения выходного напряжения преобразователя и передаточной функции, что позволило определить рабочие и частотные характеристики в нагрузочном режиме.

Исследованы дополнительные погрешности преобразователя от колебания температуры окружающей среды. Выявлены температурные зависимости отдельных параметров преобразователя. Разработана, из-за отсутствия в литературе, методика определения температурной зависимости магнитной проницаемости сплошного магнитопровода из сплава 44НХТЮ на переменном токе с учетом потерь на вихревые токи, установлен с точностью $\pm 2,5\%$ линейный характер этой зависимости в диапазоне температур $-50 \div +50^\circ\text{C}$. Определены пути снижения температурной погрешности, соответственно, в режимах холостого хода и нагрузочном, из найденных функций влияния, получаемых в свою очередь разложением аналитического выражения температурной погрешности на произведение функций влияния. В нагрузочном режиме теоретически выявлена возможность получить дополнительную температурную погрешность, не превышающую $0,3\%/10^\circ\text{C}$, что удовлетворяет требованиям ГОСТов ГСП. Экспериментально это получено подбором нагрузочного сопротивления в теоретически установленном диапазоне.

Глава 4. Экспериментальные исследования и промышленное применение МУП.

В главе рассмотрены вопросы экспериментального исследо-

вания разработанных МУП в лабораторных условиях и на объектах, из числа которых есть работающие в температурном диапазоне -50 $+50^{\circ}\text{C}$ и при повышенных частотах питания до 1000Гц .

Экспериментальная проверка соответствия рабочей характеристики преобразователя в каждой отсчетной точке теоретически определенной произведена на установке, состоящей из образцовой испытательной машины II разряда (погрешность $0,2\%$ от задаваемой величины силы P), цифровых измерительных приборов класса точности $0,3$ и стабилизированного источника с жестким контролем напряжения. В результате систематическая погрешность экспериментального определения рабочей характеристики не превышает $1,5\%$, а ее соответствие теоретически установленной лежит в пределах $6\div 8\%$. Последнее связано с экспериментально-расчетным определением зависимости текущего значения относительной магнитной проницаемости от силы из полученного алгором аналитического выражения полного сопротивления цепи возбуждения. Текущее значение относительной магнитной проницаемости в зависимости от силы, определено при условии, что известно начальное значение этой проницаемости, т.е. значение относительной магнитной проницаемости при отсутствии силы.

Экспериментальные исследования по температурному изменению тока возбуждения, проводимые в термокаве ТУ-1000 завода "НЕМА" (ГДР), подтвердили с точностью не хуже 5% достоверность полученных в главе III аналитического выражения зависимости тока возбуждения в диапазоне температур $-50\div +50^{\circ}\text{C}$, а также позволили по разработанной автором методике определить температурную зависимость магнитной проницаемости сплошного магнитопровода (на примере сплава 44НХ1Ю). Последнее позволяет проектировать силоизмерительные датчики на базе МУП со сплошным магнитопроводом для температурного диапазона $-50\div +50^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные исследования на базе действующих схем при внедрении датчиков с МУП на ограничителях грузоподъемности кранов, работающих в диапазоне температур $-50\div +50^{\circ}\text{C}$, что было имитировано камерой "Feutron", куда помещался датчик

давления с магнитоупругими преобразователями, позволили установить рабочую характеристику преобразователя в диапазоне температур $-50 \div +50^{\circ} \text{C}$.

Практическое применение разработанного датчика на основе магнитоупругого преобразователя осуществлено в системах управления следующими промышленными силовыми устройствами:

- подъемными кранами, работающими в условиях открытых строительных площадок. Управление кранами осуществляется по опрокидывающему моменту, функционально связанному с давлением в гидросистеме. Датчик давления с магнитоупругим преобразователем силы выдает информацию в счетно-решающее устройство, следящее за устойчивостью крана;

- металлорежущими станками. Датчик на базе МУП, охватывая вал механизма подачи для измерения действующей на него силы, передающейся с инструмента, обеспечивает через систему ЧПУ управление режимом резания на фрезерном станке с учетом силового фактора.

Заключение. При решении поставленных задач были выполнены перечисленные ниже исследования и получены следующие основные результаты.

1. Исследование конструкций силоизмерительных датчиков цилиндрической формы на базе МУП показало, что существующие магнитоупругие преобразователи датчиков силы имеют невысокие метрологические характеристики - недостаточную чувствительность, относительно высокую гистерезисную погрешность. Выявлены технологические и эксплуатационные недостатки применяемых сплошных ферромагнетиков. Определены технические требования к материалу магнитопровода и к конструкции преобразователя.

2. В результате анализа существующих методов расчета магнитной системы МУП предложен обобщенный метод определения электромагнитных параметров преобразователя датчика силы со сплошным магнитопроводом.

3. Разработана математическая модель тонкостенного полого цилиндрического МУП с двухсторонними обмотками возбуждения. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что

нелинейность преобразования не превышает 1,5%.

4. Найдена картина электромагнитных явлений в плоскости симметрии преобразователя датчика силы. Путем решения дифференциальных уравнений при использовании граничных условий в преобразователе определены электромагнитные параметры в произвольном сечении сплошного магнитопровода МУП. Разработана инженерная методика определения геометрических параметров на стадии проектирования МУП датчика силы для диапазона частот питания до 5 кГц.

5. Определены информационные характеристики датчика силы в функции электромагнитных параметров МУП – приращения выходного напряжения от силы и передаточная функция по напряжению питания в режимах холостого хода и нагрузочном. Найдено аналитическое выражение оптимальной в смысле чувствительности частоты питания от электромагнитных параметров его МУП. Выявлена зависимость коэффициента передачи датчика от частоты питания его магнитоупругого преобразователя.

6. Исследованы дополнительные погрешности МУП датчика силы: частотная, как оценка влияния частоты питания на выходное напряжение преобразователя, температурная, как произведение функций влияния на электромагнитные параметры. Определены пути снижения этих погрешностей.

7. Разработана инженерная методика расчета датчика силы со сплошным магнитопроводом как элемента системы управления промышленными объектами на базе высоконадежных, дешевых в изготовлении и эксплуатации полых цилиндрических МУП. Она включила в себя выбор материала магнитопровода, конструкции, расчет информационных характеристик датчика силы в функции электромагнитных параметров магнитоупругого преобразователя, получение и исследование аналитического выражения амплитудно-частотной характеристики по напряжению питания.

8. Серийное промышленное внедрение датчика на основе МУП как датчика силы осуществлено для систем безопасности по защите кранов МКАС-10, МКТС-100, МКТ-100 от перегрузок и опрокидывания, разрабатываемых Всесоюзным конструкторско-технологич-

ческим институтом ВКТИмонтажстроймеханизация. Ежегодный экономический эффект применения датчика силы на базе разработанного МУП составляет 25 тыс.рублей. Суммарный экономический эффект за 4 года продолжающегося серийного производства (1979-1983гг.) составляет 100 тыс.рублей.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Мостовой А.В., Селезнев А.П., Яковлев Б.А. Массивные магнитопроводы в электроэлементах приборной автоматики. - Труды/МЭИ, 1976, вып.291, с.58-66.

2. Калупин В.А., Мостовой А.В., Яковлев Д.А. К вопросу снижения составляющих основной погрешности МУП с кольцевым воздушным зазором. - Научн.тр./Киевский институт автоматики, 1977. Автоматизация управления шинным производством, с.114-119.

3. Гуманюк М.Н., Мостовой А.В. Современное состояние и перспективы развития магнитоупругих преобразователей. - Обзорная информация/ЦНИИ ТЭИ приборостроения.М., 1977.-59с., ил.

4. Мамаев К.М., Шумарин В.Н., Мостовой А.В. Преобразователи усилий в сдвиг фазы выходного напряжения на магнитоупругих датчиках. - В сб.: Магнитоупругие силоизмерители в промышленных системах автоматики. Киев: Об-во "Знание" УССР, 1978, с.19-20.

5. А.с. 662828 СССР Магнитоупругий датчик/А.В.Мостовой, Б.В.Мостовой, В.И.Кузнецов, А.В.Колтырин, В.В.Мостовой. - Опубл. в Б.И., 1979, № 18.

6. Гуманюк М.Н., Мостовой А.В. К вопросу повышения точности магнитоупругих преобразователей цилиндрического типа. - Вопросы совершенствования испытательных машин, приборов и средств измерения масс: Труды/НИКИМП.-М., 1980, с.67-72.

7. Мамедов Ф.И., Мостовой А.В. Исследование характеристик магнитоупругих преобразователей со сплошным магнитопроводом с учетом поверхностного эффекта. - Вопросы совершенствования испытательных машин, приборов и средств измерения масс: Труды/НИКИМП.-М., 1980, с.72-77.

8. Мамедов Ф.И., Мостовой А.В. Исследование электромагнитного поля в сплошных ферромагнитных телах при разработке магнитоупругих преобразователей. - Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: Тез.докл.Всесоюзн.совещ., г.Одесса, 13-15 октября 1981г., -М., Ич., 1981, с.248-249.

9. Сморгыо Ю.В., Мостовой А.В. Оптимизация механических и точностных свойств магнитоупругих преобразователей на сплошном магнитопроводе. - Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: Тез.докл. Всесоюзное совещание, г.Одесса, 13-15 октября 1981г. -М., Ич., 1981, с.248-249.

10. Мостовой А.В., Мамедов Ф.И., Балаев В.А. Математическая модель магнитоупругих преобразователей с аналоговым выходом. - Проблемы совершенствования испытательных машин, приборов и средств измерения масс: Труды/НИКИМП. -М., 1981, с.83-87.

11. Мамаев К.М., Мостовой А.В. Импульсный преобразователь момента. - Применение методов и средств тензометрии для измерения механических параметров: Тез.докл.Всесоюзн.конф.г.Пенза, 17-19 ноября 1982г., 1982, с.88-89.

12. Мамедов Ф.И. и др. К вопросу построения магнитоупругих преобразователей со сплошным магнитопроводом/Ф.И.Мамедов, А.В.Мостовой, В.А.Балаев, К.М.Рзаева. - Применение методов и средств тензометрии для измерения механических параметров:Тез. докл.Всесоюзн.конф., г.Пенза, 17-19 ноября 1982г., - М., 1982, с.122-123.