

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

галаков А.М., Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В. // Вестник ТГУ. - Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. С. 25-29.

Д.т.н., профессор **Поляков В.В.**, к.т.н., доцент **Дмитриев С.Ф.** и магистрант **Мали-**

ков В.Н., - АлтГУ (г. Барнаул); д.т.н., профессор **Ишков А.В.** - olg168@rambler.ru – АГАУ (г. Барнаул); к.ф.-м.н., гл. спец. **Руденский Г.Е.** и к.ф.-м.н., н. сотр., **Колубаев Е.А.** – ИФПМ СО РАН, ТПУ (г. Томск);-, АлтГУ (г. Барнаул).

УДК: 620.179.14

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С СЕРДЕЧНИКАМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В.В. Поляков, С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков, Г.Е., Руденский, Е.А., Колубаев, В.Н. Маликов

Представлены результаты численных расчетов и инженерной оптимизации двух конструкций оригинального сверхминиатюрного вихретокового преобразователя (СМВТП), предназначенного для комплектования современных приборов и программно-аппаратных комплексов неразрушающего контроля материалов методом вихревых токов с локальностью до 50 мкм².

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, электромагнитное поле, вихревой ток, неразрушающий контроль.

Введение

Во многих прикладных задачах неразрушающего контроля (НК) особое место отводится методу вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде вихревых токов под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого вихретоковым преобразователем (ВТП), и одновременной регистрации ВТП создаваемого вихревым током вторичного поля [1]. Различные конструкции ВТП позволяют одновременно определять: структурные и физико-химические свойства металлов и сплавов, твердость и электропроводность, толщину образца и его магнитную проницаемость, электропроводность и напряженность магнитного поля на поверхности и пр. Однако, для каждой конкретной измерительной задачи на практике требуется своя конструкция ВТП.

Создание современных измерительных приборов на основе МВТ требует разработки универсальной конструкции ВТП, позволяющей не только одновременно измерять 2,3 и более параметров объекта контроля, но и обеспечивать миниатюризацию самого устройства, локализацию зоны контроля и отстройку от зазора, а также учитывать при измерении чистоту подготовки поверхности и корреляцию одного параметра с другим. Известные конструкции миниатюрных ВТП (с короткозамкнутым витком, с медной вставкой и др.), хотя и обеспечивают локальность до 0,5-2 мм², не позволяют эффективно отстра-

иваться от зазора и чувствительны к шероховатости поверхности объекта контроля [2]. Кроме того в МВТ, уже сейчас необходимы приборы с локальностью до 50 мкм² и ниже.

Для выполнения этих требований ранее нами были разработаны сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи (СМВТП) с сердечниками переменного сечения, обеспечивающие такую локальность [3]. Величина сигнала в таких СМВТП сложным образом зависит от параметров контролируемого объекта, но если должным образом выстроить математическую модель отклика ВТП на поле вихревых токов, то становится возможным определять отдельно более десятка параметров исследуемого объекта.

Целью настоящей работы явилась оптимизация конструкции СМВТП на основе модели его отклика при нависании над электропроводящей неферромагнитной средой.

Постановка задачи

Задача расчета отклика СМВТП является не только математической, сводящейся к отысканию решения соответствующего уравнения для векторного потенциала в случае определенного значения обобщенного параметра - β_0 , учитывающего свойства объекта, но и физической и инженерной - связанной с подбором оптимальных условий измерений и выбором конструкции самого датчика.

Так, например, расчет напряжения в измерительной обмотке СМВТП, возбуждаемого вихревыми токами, возникающими в неферромагнитном проводящем полупростран-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2013

стве, связан с решением уравнений Максвелла и с граничными условиями, зависящими как от структуры рассматриваемых моделей среды, так и от конструкции датчика.

Известно, что при нависании витка с током над проводящей средой в плоскости, параллельной границе раздела, уравнения Максвелла принимают вид:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_{\text{ст}}; \text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (1)$$

где: \vec{H} и \vec{E} – векторы напряженности соответственно магнитного и электрического полей; \vec{B} – вектор магнитной индукции; $\vec{J}_{\text{ст}}$ – вектор плотности полного тока.

Уравнения Максвелла можно свести к уравнению Гельмгольца для векторного потенциала \vec{A} [4], определяемого выражением $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$, которое, если ток в витке изменяется по гармоническому закону с круговой частотой ω , приводится к неоднородному уравнению Гельмгольца.

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{J}_{\text{сноп}}, \quad (2)$$

где $k^2 = -j\omega\mu_a\sigma$; $j = \sqrt{-1}$; σ – удельная электропроводимость; μ – магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная.

Уравнение (2) в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} - k^2 \right) A = -\mu\mu_0 j_{ct} \quad (3)$$

Алгоритм численного решения

Уравнение 1 решается методом интегрального преобразования Фурье-Бесселя с ядром в виде функции Бесселя первого рода первого порядка.

Ранее нами уже были проведены такие расчеты для случая одной композитной среды [5] и получены простые рекуррентные формулы для расчета векторного потенциала верхнего полупространства:

$$A_1 = \mu_0 I \frac{34\eta - 10}{8\pi^2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \left(\exp\left(-\frac{3|z-h|}{2R}\right) + \varphi_1 \exp\left(-\frac{3|z+h|}{2R}\right) \right) \int_{\lambda=\frac{3}{2R}}^{\frac{3}{2R}}$$

для каждого слоя:

$$A_p = \mu_0 \mu_p I \frac{34\eta - 10}{8\pi^2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \exp\left(-\frac{3h}{2R}\right) \frac{\lambda}{q_p} (f_p \exp(q_p z) + \varphi_p \exp(-q_p z)) \int_{\lambda=\frac{3}{2R}}^{\frac{3}{2R}}$$

и для нижнего полупространства:

$$A_n = \mu_0 \mu_n I \frac{34\eta - 10}{8\pi^2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \exp\left(-\frac{3h}{2R}\right) \frac{\lambda}{q_p} f_p \exp(q_p z) \int_{\lambda=\frac{3}{2R}}^{\frac{3}{2R}}$$

в которых использованы следующие нормированные переменные: $\eta = R_2/R_1$, если $R_2/R_1 \leq 1$ или $\eta = R_1/R_2$, если $R_1/R_2 \leq 1$; $\zeta = z/2R_1$, если $\eta = R_2/R_1$ или $\zeta = z/2R_2$, если $\eta = R_1/R_2$.

Эти формулы могут использоваться и для расчетов параметров поля вихревых то-

ков для случая электропроводящей неферромагнитной среды.

Расчет СМВТП проводился в MathCad [6] в следующей последовательности: 1) задавались параметры среды, частота электромагнитного поля и сила тока в возбуждающей обмотке μ, σ, f, J ; 2) задавались начальные расстояния от датчика до поверхности среды и до эквивалентного витка, замещающего возбуждающую обмотку ВТП h_1, h_2 ; 3) задавались начальные параметры датчика: число витков и радиус двух обмоток W_1, W_2, R_1, R_2 ; 4) по заданным параметрам среды и датчика рассчитывалась величина β_0 , действительная и мнимая компонента и абсолютное значение напряжения в измерительной обмотке СМВТП - $Re(U), Im(U), U$; 5) параметры $h_1, h_2, W_1, W_2, R_1, R_2$ увеличивались на величину шага Δ и производился новый расчет $Re(U), Im(U), U$.

Анализ результаты расчетов, оптимизация конструкции смвtp

С использованием полученных выше выражений нами были проведены расчёты напряжений, вносимых в измерительную обмотку СМВТП для малых R_1, R_2, h_1 и z в условиях несущественности магнитных потерь и определяющем влиянии гистерезисных потерь $tg\delta$ в магнитопроводе датчика для выбранной модели [4]. Результаты некоторых из проведенных расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов напряжения, вносимого в измерительную обмотку СМВТП

$h_1, \text{ м}$	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
$h_2, \text{ м}$	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
β_0	0,2993	0,4088	0,4088	0,2993
$\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_0}$	0,73	0,71	0,54	0,48
$Re_{\omega 1}(\lambda) \times 10^4$	100	160	160	100
$Im_{\omega 1}(\lambda) \times 10^4$	2	6	2	2
$U_0, \text{ В}$	0,536	11,08	6,57	11,08
$Re(U_{\text{вн}}) \times 10^2$	1,25	2,12	0,353	2,68
$Im(U_{\text{вн}}) \times 10^4$	2,5	0,794	1,35	2,68

Анализ проведенных расчетов и зависимостей импеданса СМВТП от действительной части напряжения, вносимого в его измерительную обмотку полем вихревых токов, возникающих в нижнем полупространстве неферромагнитной проводящей среды, показали, что при малых значениях обобщенного параметра β_0 МВТ удается получить однозначное численное решение уравнения для векторного потенциала, позволяющее вы-

строить линейный годограф $Im(U)=f(Re(U))$ – рисунок 1.

Как видно из рисунка 1, с заданными параметрами датчика можно уверенно фиксировать измерительные сигналы СМВТП вплоть до 0,5В, что позволяет, подключив их непосредственно к маломощным трактам звуковых адаптеров персональных компьютеров (ПК), создавать современные программно-аппаратные комплексы, выступающих в роли виртуализированных приборов неразрушающего контроля (НК) широкого спектра применения [7].

Приведем пример оптимизации конструкции и геометрии сердечника СМВТП. В качестве начальных параметров датчика и постоянных параметрах среды были выбраны следующие: магнитная проницаемость сердечника $\mu_{max}=5 \times 10^2$ Гн/м при его удельной проводимости $\sigma=22,5 \times 10^6$ См/м, сила тока в обмотке датчика $J_{mo}=30$ МА частотой $f_p=3 \times 10^3$ Гц, числа витков измерительной и токовой обмоток и их средние радиусы, соответственно, $W_1=20$, $W_2=400$ и $R_1=0,5 \cdot 10^{-4}$ м, $R_2=1,3 \cdot 10^{-4}$ м, расстояние от датчика до поверхности $h_1=0 \div 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, расстояние от эквивалентного витка, заменяющего возбуждающую обмотку трансформаторного датчика отраженного поля, до объекта $h_2=0 \div 0,2 \times 10^{-3}$ м.

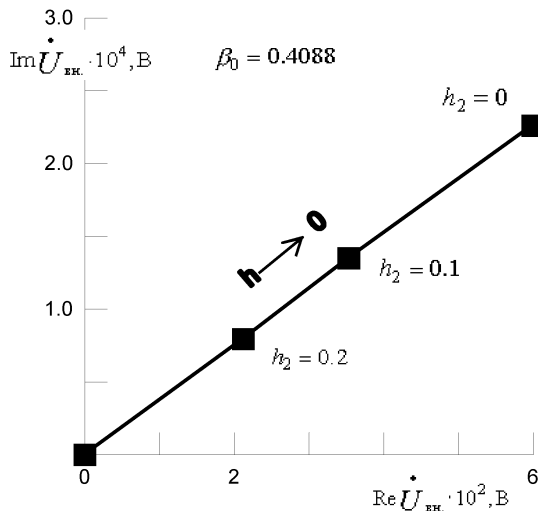


Рисунок 1 – Годограф напряжения, вносимого в измерительную обмотку СМВТП, при изменении расстояния между катушками

Магнитные потери определим по известной формуле:

$$W_t = \frac{10^{-7}}{4} B_{max}^2 f \frac{tg \delta}{\mu}. \quad (4)$$

Тогда, с учётом проницаемости ферритового сердечника и локальности магнитопровода СМВТП, выражение для напряже-

ния, вносимого в его измерительную обмотку примет вид:

$$U'_0 = 1.7 \cdot 10^{-6} \omega (m' - 0.3) \sqrt{D_1 D_2} W_1 W_2 \mu * I_{\omega} \sqrt{\frac{W - W_t V}{W}},$$

а действительная и мнимая компоненты абсолютного напряжения, вносимого в измерительную обмотку СМВТП, будут, соответственно, рассчитываться по формулам:

$$Re(\dot{U}_{вн}) = U'_0 * \exp(-3\xi) * Re(\varphi_1(\lambda)), \quad (5)$$

$$Im(\dot{U}_{вн}) = U'_0 * \exp(-3\xi) * Im(\varphi_1(\lambda)). \quad (6)$$

Соответствующий годограф $Re = f(Im)$ для низких значений обобщенного параметра β_0 , как было показано выше, линейно зависит от параметров нависания СМВТП над контролируемым объектом и может быть непосредственно использован в качестве приборной функции в приборах НК, использующих раздельную обработку сигнала и векторную форму представления результатов на комплексной диаграмме. Оптимизация СМВТП в этом случае может осуществляться путем регулирования расстояния между катушками, их сближением на коническом или пирамидальном сердечнике с фиксированными геометрическими параметрами.

Если изменять не только расстояние между обмотками, но и другие параметры сердечника (конусность, соотношение площадей оснований пирамиды), параметры обмоток (W_1 , W_2 , R_1 , R_2), включая расстояния h_1 , h_2 , можно прийти к «классической» нелинейной форме годографа, показанной на рисунке 2.

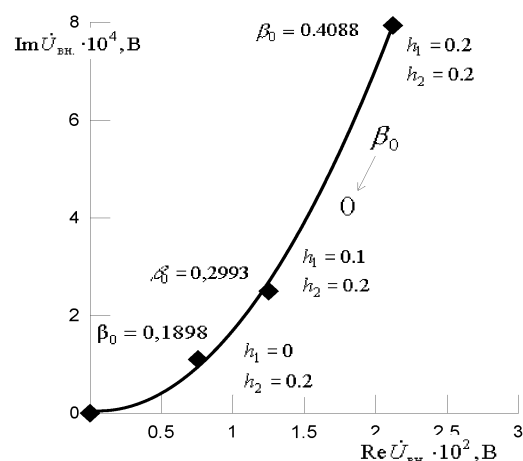


Рисунок 2 – Годограф напряжения, вносимого в измерительную обмотку СМВТП, при изменении параметров катушек

С применением данного годографа можно решать прикладные задачи на основе МВТ (толщинометрия, исследования электрических, магнитных характеристик и морфологии

неферромагнитного проводящего полупространства, выбора оптимальных частот возбуждения вихревых токов в многослойных средах и др.), тогда как линейный годограф (рисунок 1), можно использовать для решения задач на стадии разработки СМВТП (оптимизация конструкции датчика, исследования его работы в области высоких частот и проводимостей и др.)

На основе анализа годографов было разработано два типа конструкции СМВТП с электрическими характеристиками, позволяющими непосредственно подключать их к аналоговому входу/выходу звукового адаптера ПК и большинству современных приборов НК (рисунки 3, 4).

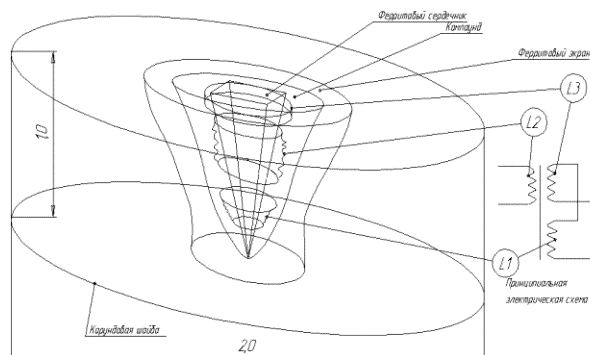


Рисунок 3 – Схема конструкции СМВТП для прямых технических измерений

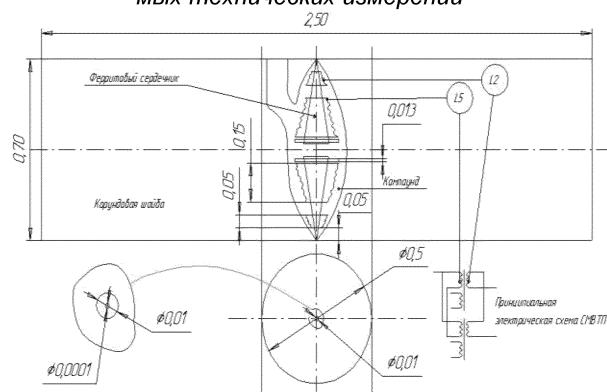


Рисунок 4 – Схема конструкции СМВТП для точных измерений и дефектоскопии

Первый тип датчика выполнен по схеме дифференциального СМВТП с тремя катушками, одна из которых является калибровочной, а другие – возбуждающей и измерительной (рисунок 3). Второй тип датчика представляет собой дифференциальный вихретоковый преобразователь, работающий в режиме самосравнения или сравнения с внутренним эталоном (рисунок 4). В качестве материала сердечников обоих СМВТП используется среднечастотный малодиссипативный феррит, выбранный из ферритов марки 2000НМЗ (ГОСТ 12635-67) по величине

максимальной начальной магнитной проницаемости.

Первый тип конструкции СМВТП позволяет проводить с относительной погрешностью до 5% прямые технические измерения различных характеристик материалов, величина которых функционально зависит от напряжения в измерительной обмотке СМВТП. Для повышения точности воспроизводимости и достоверности измерений этот СМВТП требует использования дополнительной защиты от возможных наводок от посторонних переменных магнитных полей, но зато в нем может быть осуществлен режим абсолютной калибровки. Область применения СМВТП этого типа – вихретоковая толщинометрия и измерения физических параметров неферромагнитных электропроводящих материалов.

Вторая конструкция СМВТП обеспечивает его работу в режиме самосравнения, однако конструктивно датчик изготовлен по принципу сравнения со стандартным образцом, т.е. рабочий и образцовый СМВТП не связаны индуктивно и имеют независимые измерительные и возбуждающие обмотки. Такая конструкция СМВТП обеспечивает измерение характеристик материалов с относительной погрешностью уже до 0,1-0,5 %, защищает рабочий СМВТП от внешних наводок и позволяет использовать его для комплектования большинства современных приборов НК и дефектоскопов МВТ.

Дифференциальное включение катушек и фокусировка возбуждающего поля сердечником позволяет датчикам обоих типов проводить высокочувствительные локальные исследования проводящих материалов на площади до 50 мкм².

Для сконструированных СМВТП была разработана технология изготовления сигнальных и генераторных катушек с использованием оригинальной оснастки для микроиниаторных намоточных работ. Катушки СМВТП пропитаны эпоксидным компаундом и обеспечивают устойчивую работу датчиков при температурах до 180-200 °С, а сами датчики с системой распайки помещены в пластмассовый корпус держателя.

Выводы

1. На основе разработанной модели отклика СМВТП построены годографы напряжения, наводимого в измерительной обмотке датчика полем вихревых токов.
2. Анализ полученных годографов $Im(U)=f(Re(U))$ и подбор параметров катушек СМВТП и геометрии сердечника датчика позволили оптимизировать его конструкцию для

проведения технических измерений электрических и магнитных параметров материалов и их дефектоскопии.

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. № 02.G25.31.0063).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. - М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. / В.В. Ключев, Ф.П. Соснин, В.Н. Филинов и др. Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1995.
3. Дмитриев, С.Ф. Виртуализированные измерительные приборы, реализующие метод вихревых токов/ Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н., Новоженев А.В. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография. -Кн. 28. -Воронеж: ВГПУ, 2010. с. 580-592.

4. Гинзбург, В.Л. Электродинамика./ В.Л. Гинзбург. --М.: Наука. 2004.
5. Сагалаков, А.М. Об одной модели отклика вихретокового преобразователя/ Сагалаков А.М., Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В. // Вестник ТГУ. - Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. с. 25-29.
6. Дьяконов, В.П. Mathcad 11/12/13 в математике : справочник./ В. П. Дьяконов. - М. Горячая линия. Телеком, 2007.
7. Ишков, А.В., Современная концепция сопряжения измерительных приборов с ЭВМ/ Ишков А.В., Дмитриев С.Ф. //Измерение, контроль, информатизация: Материалы восьмой междунар. научн.-техн. конф. -Барнаул: АлтГТУ, 2007. с.3-6.

Д.т.н., профессор Поляков В.В., к.т.н., доцент Дмитриев С.Ф. и магистрант Маликов В.Н., - АлтГТУ (г. Барнаул); д.т.н., профессор Ишков А.В.- olg168@rambler.ru – АГАУ (г. Барнаул); к.ф.-м.н., гл. спец. Руденский Г.Е. и к.ф.-м.н., н. сотр., Колубаев Е.А. – ИФПМ СО РАН, ТПУ (г. Томск);-, АлтГТУ (г. Барнаул)

УДК: 662.997.05(043)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОДНООСНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ

А.С. Петрусёв, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина

В статье рассмотрена практическая проблема увеличения мощности солнечной станции без значительного увеличения материальных затрат. Описана система слежения за Солнцем для фотоэлектрических модулей (ФМ) и энергетических систем. Также представлены результаты расчетов параметров, влияющих на эффективность сбора энергии. Приведены результаты натурных испытаний работы фотоэлектрических модулей с системой слежения в Томске.

Ключевые слова: фотоэлектрические модули, система слежения, эффективность.

Введение

В наше время для получения энергии человек в подавляющем большинстве использует полезные ископаемые, но их запасы ограничены, что стало особенно заметно в последние годы. К тому же выбросы токсичных веществ в атмосферу, выделяющихся при сгорании топлива, постепенно уничтожают нашу планету. В связи с указанными проблемами применение нетрадиционных источников энергии становится вполне оправданным. Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна.

Томский политехнический университет (ТПУ) поддерживает развитие «зелёной энергетики» - на крыше 18 корпуса ТПУ установ-

лены 12 фотоэлектрических модулей (ФМ) суммарной мощностью 3кВт. Данная система является источником электроэнергии для двух аудиторий и трех уличных фонарей, расположенных на территории корпуса и работающих в темное время суток.

Для увеличения эффективности сбора солнечной энергии фотоэлектрическими установками наиболее перспективным является метод периодического ориентирования системы на солнце. Использование подобных систем требует оптимизации режимов работы системы ориентирования с целью уменьшения энергозатрат и механических перемещений всех системы. Для проведения оптимизации была построена математическая модель ФМ с системой ориентирования и для натурной отработки был создан макет системы слежения.