

ТЫНЯНСКИЙ АРТЕМ АНДРЕЕВИЧ

На правах рукописи



**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СРЕДСТВ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.11.13. - Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва, 2005 г.

Работа выполнена в Московской государственной академии
приборостроения и информатики

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Шатерников В.Е.

Официальные оппоненты:

Воробьев В.А.
доктор технических наук, профессор

Артемьев Ю.Г.
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация ЗАО НИИИИ МНПО "СПЕКТР"

Защита состоится "22" февраля 2005 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.119.01 в Московской государственной академии приборостроения и
информатики по адресу: 107846, г. Москва, Стромьнка, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии.
Автореферат разослан "20" января 2005г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



В.В.Филинов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. Актуальность.

В настоящее время развитие и совершенствование электромагнитных методов и средств неразрушающего контроля обусловлено ростом объемов изделий и сложностью объектов контроля, высокими требованиями к информативности и достоверности результатов, а также высокой производительностью технологий контроля. Всё это привело к созданию многоэлементных преобразователей, потенциальные возможности которых значительно выше, чем у классических одноэлементных преобразователей или систем из них, подключенных к многоканальным устройствам. В известных многоэлементных матричных преобразователях в качестве чувствительных элементов используются магниторезисторы, магнитодиоды и триоды, датчики Холла, феррозонды, металлоплёночные, твердотельные и доменные преобразователи. Наряду с достоинствами они обладают такими недостатками как ограничение области применения только ферромагнитными изделиями простой формы, сильное влияние на результаты контроля различного рода помех, неточности установки, перекосов и зазоров относительно контролируемой поверхности, необходимости выполнения большого количества токоподводов к ним, что приводит к усложнению приборов и снижает точность и надёжность контроля.

Наиболее перспективным направлением развития и совершенствования многоэлементных преобразователей является применение в качестве чувствительных элементов однотипных унифицированных вихретоковых датчиков с оптимизированной простой самостоятельной системой их ориентации и установки на контролируемой поверхности независимо от её формы с последующим конструктивным объединением в единый многоэлементный электромагнитный преобразователь (МЭП) с N - элементами. Работы в этом направлении были начаты в КуАИ и продолжены в МГАПИ под руководством профессора Шатерникова В.Е. его учениками Корнеевым Б.В., Меркуловым А.И. Стеблевым Ю.И. Ими были предложены принципы построения матричных вихретоковых преобразователей различного типа и назначения, разработан ряд систем ориентации и установки элементов МЭП на контролируемую поверхность и дано решение некоторых теоретических задач по расчёту поля от системы линейных элементов МЭП.

Однако дальнейшее развитие, совершенствование и широкое применение МЭП для решения актуальных задач неразрушающего контроля сдерживалось отсутствием строгой теории и точных аналитических выражений для расчёта и анализа параметров математических моделей систем «МЭП - контролируемый объект», основ проектирования МЭП и анализа их характеристик, а также принципов построения новых более совершенных преобразователей и устройств. Решению этих актуальных задач и посвящена данная диссертация. Эта работа выполнена в соответствии с НИР по темам ТИГ-717 и ТИГ-726, проводимым в МГАПИ в 2002-2005 гг. по Федеральной целевой программе «Интеграция науки и высшего образования России» и научно-технической программе Минобрнауки России «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники».

1.2. Цель работы и задачи исследования.

Целью данной диссертации является создание строгой и адекватной теории расчета выходных сигналов МЭП с чувствительными элементами в виде круглых катушек индуктивности на базе решения задач электродинамики об их электромагнитном взаимодействии с контролируемым электропроводящим объектом и разработка на этой основе более совершенных конструкций МЭП с улучшенными метрологическими характеристиками

- Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:
- Разработать математические модели взаимодействия электромагнитного поля МЭП с круглыми катушками с поверхностью контролируемого объекта без дефекта и с учетом влияния дефекта в виде трещины.
- Создать математический аппарат, удобный для расчета на ЭВМ выходных сигналов МЭП при различном включении их катушек с учетом конструктивных и информативных параметров, а также мешающих факторов.
- Выполнить анализ выходных сигналов МЭП и дать рекомендации по оптимизации их обобщенных параметров, построения совершенных конструкций МЭП и выбору режимов контроля.
- Разработать принципиально новые МЭП с улучшенными метрологическими характеристиками и на их основе приборы и средства, имеющие высокую производительность и достоверность контроля.

1.3. Методы исследования:

Математическая модель МЭП определяется на основе решения задач электродинамики о взаимодействии N круговых контуров с переменным током с проводящей поверхностью без дефекта и с трещиной. Используя интегральное преобразование Фурье-Бесселя и теорему сложения волновых цилиндрических функций, полученные решения приводятся к виду, удобному для расчёта и анализа на ЭВМ выходных сигналов МЭП через обобщённые параметры α , β , γ . Конструктивные параметры МЭП и режимы контроля определяются методом их оптимизации с учётом получения максимума чувствительности к контролируемому параметру.

1.4. Научная новизна работы заключается в следующем:

- получены математические выражения для точного расчета на ЭВМ через обобщённые параметры вносимых напряжений и сопротивлений трансформаторных и параметрических МЭП при согласном и встречном включении их катушек, а также формулы для расчёта векторных потенциалов электромагнитного поля и составляющих плотности вихревых токов, наводимых в проводящем объекте от воздействия на него поля МЭП.
- для предложенной расчётной модели "МЭП - контролируемое изделие с дефектом типа трещина" получены математические формулы для расчёта и анализа вносимых трещиной параметров МЭП и разработан алгоритм их вычисления на ЭВМ.
- установлены закономерности изменения вносимых параметров МЭП при согласном и встречном включении их элементов в зависимости от электрофизических свойств, зазоров, величины дефектов и конструктивных размеров преобразователей, а также определены оптимальные значения обобщённых параметров α , β , γ для получения максимальной чувствительности по контролируемой величине.

1.5. Практическая ценность работы заключается в том, что:

- даны рекомендации по выбору оптимальных режимов контроля, конструированию различных типов МЭП, по разработке устройств позиционирования и ориентации элементов и схем их соединения;
- разработаны новые оригинальные конструкции 2-х, 4-х и 16-ти элементных МЭП с повышенной информативностью и производительностью контроля;
- Разработано и усовершенствовано два типа дефектоскопов с МЭП: импульсный дефектоскоп "ВД1-МЭП", 4-х и 16-ти каналные дефектоскопы "ВД4-МЭП" и "ВД16-МЭП" с высокой производительностью и информативностью контроля.

1.6. Реализация и внедрение результатов работы:

Разработанные МЭП и приборы успешно прошли опытно-промышленное применение для контроля ответственных элементов и узлов авиационной, космической и оборон-

ной техники на предприятиях: ГП "НИМИ", Российский НИИ космического приборостроения, Межотраслевой научный центр оборонных отраслей промышленности "АТАКС" и ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр».

1.7. Аprobация работы.

Основные результаты докладывались на VI и VII Международных научно-практических конференциях «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права» (г. Сочи, 2003, 2004г.), на 3-ей Международной научно-технической конференции «Применение средств неразрушающего контроля и диагностики в промышленности» (Москва, 2003 г.), научно-технических семинаров и НТС в МГАПИ, НИИИИ МНПО "Спектр", ГП "НИМИ".

1.8. Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работы, список которых приведен в автореферате.

1.9. Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, иллюстрируется 53 рисунками и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 101 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, методы их решения, приведены новые научные результаты, их практическая ценность и значимость, указана апробация и публикации по работе, дана структура диссертации.

В первой главе приводятся обзор и анализ в области разработки, теории и практического применения многоэлементных преобразователей и устройств для неразрушающего контроля промышленных изделий. Дается анализ многоэлементных преобразователей и устройств различного типа, в том числе и матричных, в которых в качестве чувствительного элемента используются магниторезисторы, магнитодиоды и триоды, датчики Холла, феррозонды, металлоплёночные, твердотельные и доменные преобразователи. Обосновывается преимущества по сравнению с ними и перспективность применения многоэлементных электромагнитных преобразователей (МЭП) с вихретоковыми элементами в виде круглых катушек. Развитие работы в этом направлении позволит повысить производительность, надежность, информативность, точность и многопараметровость, а также расширить функциональные возможности электромагнитного неразрушающего контроля. В этой главе приводится классификация МЭП, обосновывается актуальность темы диссертации, поставлена цель и задачи исследований и показаны пути их решения.

Вторая глава посвящена теории многоэлементных преобразователей для неразрушающего контроля металлоизделий. В общем случае расчетная модель МЭП представлена в виде N круговых контуров с переменным током, расположенных в плоскопараллельных плоскостях над электропроводящим металлическим изделием.

Такая система описывается неоднородным уравнением Гельмгольца для векторного потенциала \vec{A} в цилиндрической системе координат. Используя метод суперпозиции решение этого уравнения для векторного потенциала в диэлектрической среде I представляется в виде суммы:

$$\vec{A}_i = \sum_{k=1}^N \vec{A}_{i,k} + \sum_{j=1}^N \vec{A}_{j,i} \quad (1)$$

где $\vec{A}_{pk}, \vec{A}_{pt}$ – вектор-потенциалы соответственно первичного и вторичного поля вихревых токов k -го витка в локальной системе координат $(\vec{Z}_k, \rho_k, \theta_k)$.

При расчёте электромагнитного поля используется теорема сложения волновых цилиндрических функций для представления функций Бесселя в k -той системе координат через круговые цилиндрические функции в i -той системе.

В результате решения получены формулы для расчёта вектор-потенциалов в области i -го контура:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{\omega i} = & 0,5\mu_0\mu_1 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N R_k W_k \underline{L}_k \frac{\gamma_k + \cos(\theta_i - \alpha_k)}{\gamma_k \sin \theta_i + \sin \alpha_k} \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_{1-n}(\lambda l_k) J_n(\lambda \rho_i) \sin[(1-n)\alpha_k + n\theta_i] e^{-\lambda(z_i - h_k)} d\lambda - \end{aligned} \quad (2)$$

$$-0,5\mu_0\mu_1 R_i W_i \underline{L}_i \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_i) J_1(\lambda \rho_i) \times e^{-\lambda(z_i - h_k)} d\lambda$$

$$\begin{aligned} \underline{A}_{\rho i} = & 0,5\mu_0\mu_1 \sum_{k=1}^N R_k W_k \underline{L}_k \frac{\gamma_k + \cos(\theta_i - \alpha_k)}{\gamma_k \sin \theta_i + \sin \alpha_k} \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_{1-n}(\lambda l_k) J_n(\lambda \rho_i) \times \\ & \times \sin[(1-n)\alpha_k + n\theta_i] e^{-\lambda(z_i - h_k)} \frac{q - \lambda}{q + \lambda} d\lambda - \end{aligned} \quad (3)$$

$$-0,5\mu_0\mu_1 R_i W_i \underline{L}_i \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_i) J_1(\lambda \rho_i) \times e^{-\lambda(z_i - h_k)} \frac{q - \lambda}{q + \lambda} d\lambda$$

где $k = 1, 2, \dots, N$, W_k – число витков k -ой катушки, R_k – её радиус, $J_1(\lambda R_k)$ и $J_1(\lambda \rho_k)$ функции Бесселя 1-го рода 1-го порядка, $q = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\mu_2\sigma_2}$, λ – переменная интегрирования, $\gamma_k = \rho_i/l_k$, l_k – расстояние между i -ым и k -ым контуром.

Вносимое напряжение в i -ую катушку МЭП вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\omega i} = & 0,5\mu_0\mu_1 W_i R_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N R_k W_k \underline{L}_k \int_0^{2\pi} \frac{\gamma_k + \cos(\theta_i - \alpha_k)}{\gamma_k \sin \theta_i + \sin \alpha_k} \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_{1-n}(\lambda l_k) J_n(\lambda \rho_i) \times \\ & \times \sin[(1-n)\alpha_k + n\theta_i] e^{-\lambda(z_i - h_k)} \frac{q - \lambda}{q + \lambda} d\lambda d\theta_i - \end{aligned} \quad (4)$$

$$-j\pi\mu_0\mu_1 R_i^2 W_i^2 \underline{L}_i \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_1(\lambda \rho_k) e^{-\lambda(z_i - h_k)} \frac{q - \lambda}{q + \lambda} d\lambda$$

Если катушки МЭП включаются между собой согласно или встречно, то полное вносимое напряжение такого МЭП, имеющего N катушек определяется по формуле:

$$\underline{U}_{\omega N} = \sum_{i=1}^N \underline{U}_{\omega ni} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N-1} P_{ik} \underline{U}_{\omega nk} \quad (5)$$

где $p_{ki} = \pm 1$ - определяется способом включения i -той и k -той катушек.

Если катушки расположены в один ряд и имеют радиус $R_k = R_i = R$ и $W_i = W_k = W$, то получим выражение для расчёта полного вносимого сопротивления линейного МЭП при согласном включении N катушек:

$$\begin{aligned} Z_{\text{вн}} = & -0,5j\omega\mu_0\mu_1W^2R^2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N R_k W_k \underline{L}_k \int_0^{2\pi} \frac{\gamma_{ki} + \cos(\theta_i - \alpha_{ki})}{\gamma_{ki} \sin \theta_i + \sin \alpha_{ki}} \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_{1-n}(\lambda l_{ki}) J_n(\lambda \rho_i) \times \\ & \times \sin[(1-n)\alpha_{ki} + n\theta_i] e^{-\lambda(z-h)} \frac{q-\lambda}{q+\lambda} d\lambda d\theta - \\ & - j\pi\mu_0\mu_1NR^2W^2 \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_k) J_1(\lambda \rho_k) e^{-\lambda(z-h)} \frac{q-\lambda}{q+\lambda} d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

Получено также выражение для расчёта полного вносимого трещиной сопротивле-
ния iV-катушечного МЭП:

$$\begin{aligned} Z_{\text{ВН}} = & \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вн}}^{(k)}}{\underline{L}_k} = j\omega W^2 R_i \int_0^{2\pi} [0,5\mu_0\mu_2 \sum_{k=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_k \times \\ & \times \frac{\gamma_{ki} + \cos(\Theta_i - \alpha_k)}{\sin \alpha_k + \gamma_{ki} + \sin \Theta_i} \int_0^{\infty} \frac{\lambda}{q} (F(\rho)e^{qz} + F(\theta)e^{-qz}) e^{-\lambda z} \times \\ & \times \Im_1(\lambda R_k) \Im_{1-n}(\lambda l_{ki}) \Im_n(\lambda \rho_i) \sin[(1-n)\alpha_{ki} + n\Theta_i] d\lambda + \\ & + 0,5\mu_0\mu_2 R_i W^2 \int_0^{\infty} \frac{\lambda}{q} (F(\rho)e^{qz} + F(\theta)e^{-qz}) e^{-\lambda z} \Im_1(\lambda R_i) \Im_1(\lambda \rho_i) d\lambda + \\ & + 0,5\mu_0\mu_2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_k \frac{\sin(\Theta_i - \alpha_{ki})}{\sin \alpha_{ki} + \gamma_{ki} + \sin \Theta_i} \int_0^{\infty} \frac{\lambda}{q} (qe^{-qz} + e^{-\lambda z}) \times \\ & \times \Im_1(\lambda R_k) \Im_{1-n}(\lambda l_{ki}) \Im_n(\lambda \rho_i) \sin[(1-n)\alpha_{ki} + n\Theta] d\lambda + \\ & + \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \underline{L}_0 \mu_0 \mu_2 \left\{ \frac{\beta \sin \varphi}{(\alpha\beta + 0,5)^2 + \beta^2 \sin^2 \varphi} - \frac{\alpha\beta + 0,5}{(\alpha\beta + 0,5)^2 + \beta^2 \sin^2 \varphi} + \right. \\ & \left. + j \left[\frac{\beta \sin \varphi}{(\alpha\beta + 0,5)^2 + \beta^2 \sin^2 \varphi} + \frac{\alpha\beta + 0,5}{(\alpha\beta + 0,5)^2 + \beta^2 \sin^2 \varphi} \right] \right\} \sin \varphi d\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные выражения позволяют рассчитать вносимые характеристики МЭП через обобщённые параметры α, β, γ определяющие электрофизические свойства материала контролируемого объекта, геометрические и конструктивные параметры МЭП.

В третьей главе приводится расчёт и анализ выходных сигналов МЭП, даётся алгоритм расчёта вносимых параметров при изменении электрофизических свойств материала, зазоров и расстояния между элементами при согласном и встречном включении катушек.

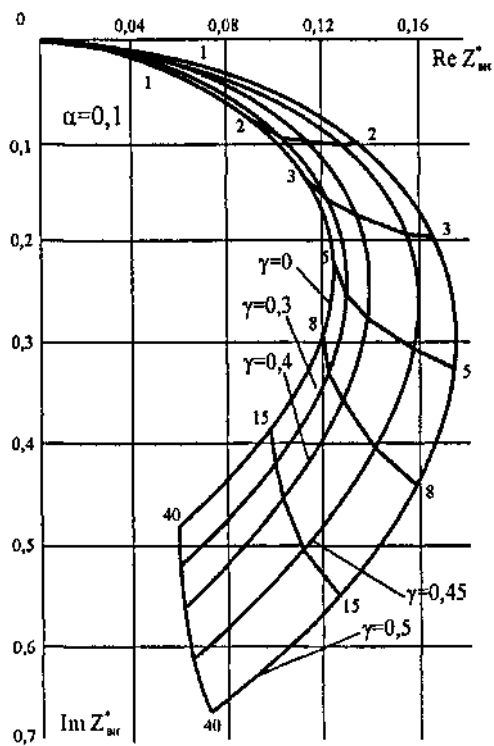
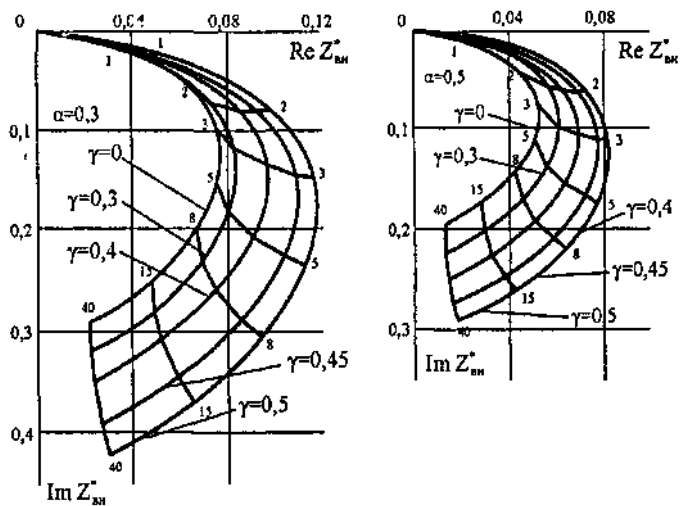


Рис. 1 Годографы вносимого сопротивления двух катушечного МЭП для согласованного включения катушек при $\alpha=0,1; 0,3$ и $0,5$

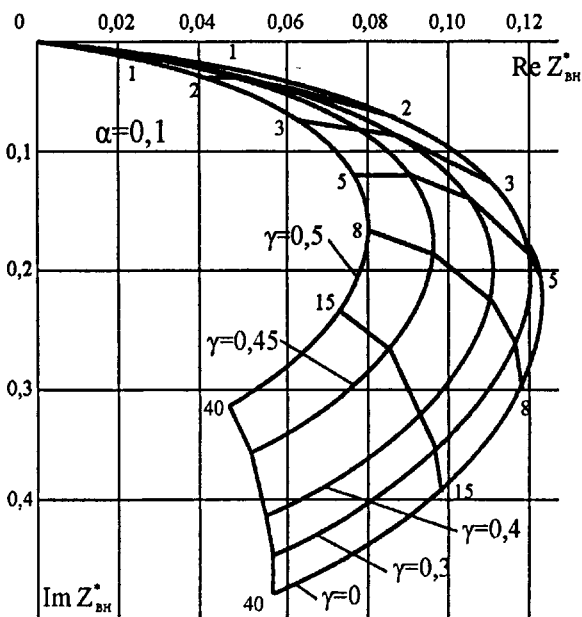
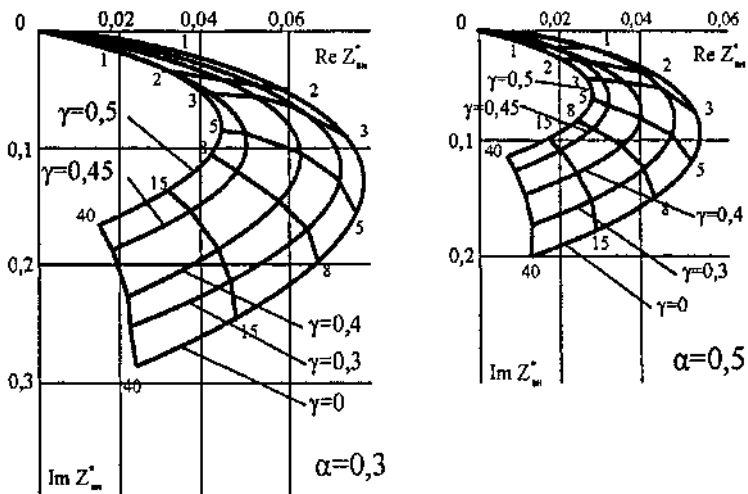


Рис. 2 Годографы вносимого сопротивления двух катушечного МЭП для встречного включения катушек при $\alpha=0,1; 0,3$ и $0,5$

На Рис. 1 Рис. 1 приведены годографы вносимого сопротивления МЭП при согласованном и встречном включении в зависимости от обобщённых параметров α , β , γ . Установлено, что для согласного включения при изменении зазора (параметра α от 0,1 до 0,5) качественно вид годографов в зависимости от β и γ сохраняется, при этом с увеличением a область параметров β , в которой активная составляющая вносимого сопротивления достигает максимума, смещается в сторону меньших значений β . Так при $\alpha=0,1$ максимум находится в области $4 < \beta_{\max} < 6$, а при $\alpha=0,5$ – $2,5 < \beta_{\max} < 4$. Область изменения β , в которой активная составляющая имеет максимум мало зависит от расстояния между элементами (γ).

Для встречного включения характер изменения годографов в зависимости от α , β , γ практически совпадает для МЭП при согласном включении.

Анализ изменения фазы вносимого сопротивления позволяет реализовать фазовый метод отстройки от изменения зазора при измерении электропроводности и дефектоскопии изделий.

В диапазоне $12 < \beta < 40$ между годографами вносимых параметров от β и линиями отвода от α как для согласного, так и для встречного включения элементов имеются углы раздела близкие к 90° , что позволяет применять амплитудно-фазовые методы отстройки от мешающих факторов.

В работе определены чувствительность МЭП по электропроводности: $S_\sigma = \frac{\Delta Z_{in}(\sigma)}{\Delta \sigma}$

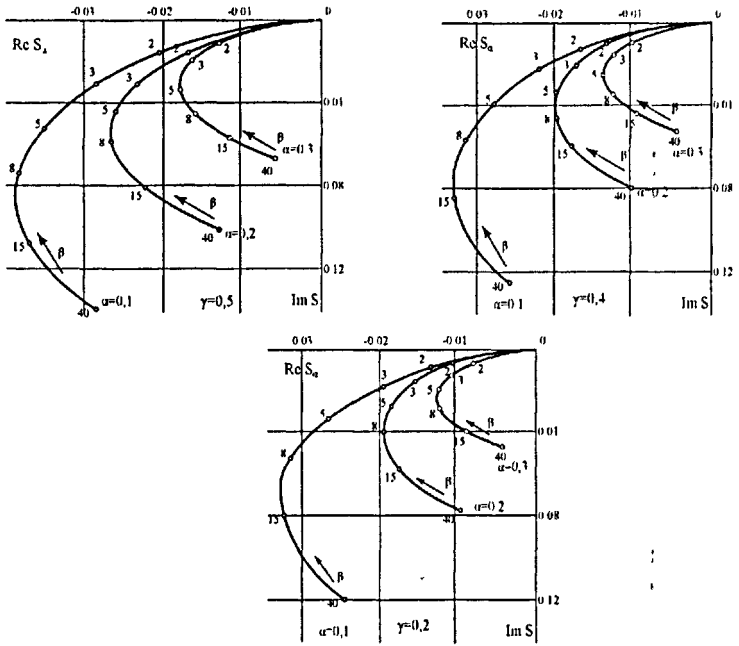
и по зазору: $S_\alpha = \frac{\Delta Z_{in}(\alpha)}{\Delta \alpha}$.

На Рис. 3 приведены диаграммы чувствительности МЭП от изменения зазора a при различных β и γ для согласного и встречного включения.

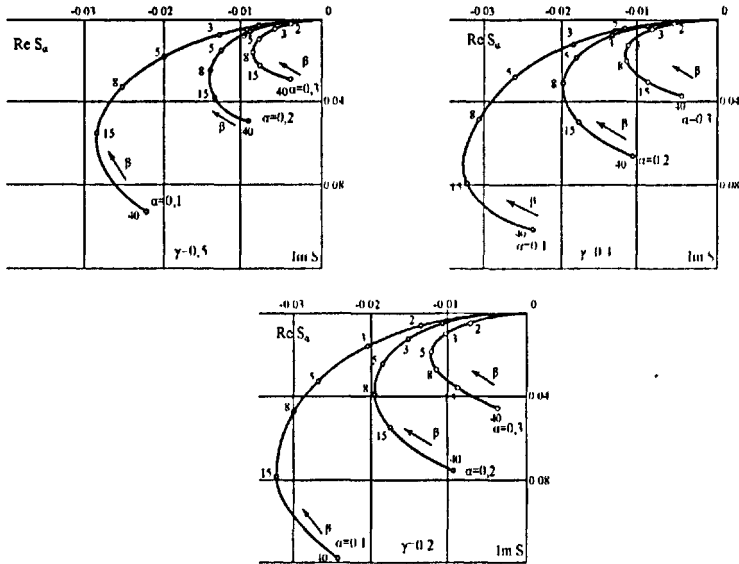
Из их анализа следует, что для различных включений элементов МЭП с увеличением α чувствительность падает в диапазонах изменения $\gamma=0,5 \div 0,1$, $\beta=1 \div 40$, при этом имеется максимум чувствительности по активной составляющей ($Re S_\alpha$). При изменении расстояния между элементами (γ) в сторону уменьшения γ при согласном включении реактивная составляющая чувствительности ($Im S_\alpha$) уменьшается, а при встречном увеличивается.

В работе рассчитаны и проанализированы распределения плотности вихревых токов в изделии и вносимые трещиной сопротивление МЭП.

На Рис. 4 приведены годографы вносимого сопротивления МЭП при расположении трещины между двумя катушками при различных включениях. Из анализа этих годографов следует, что вносимые трещиной сопротивление МЭП при согласном включении больше, чем при встречном, если трещина проходит под центрами катушек, если же трещина походит под одной катушкой, то вносимое сопротивление больше при встречном включении. Достоверность теоретических исследований подтверждается экспериментальными данными, полученными с помощью компьютеризированной установки «КОМВИС-М» на стандартных и специальных образцах.



a)



б)

Рис. 3 Зависимость чувствительности МЭП от изменения зазора для различных β и γ при согласном (а) и встречном включениях (б)

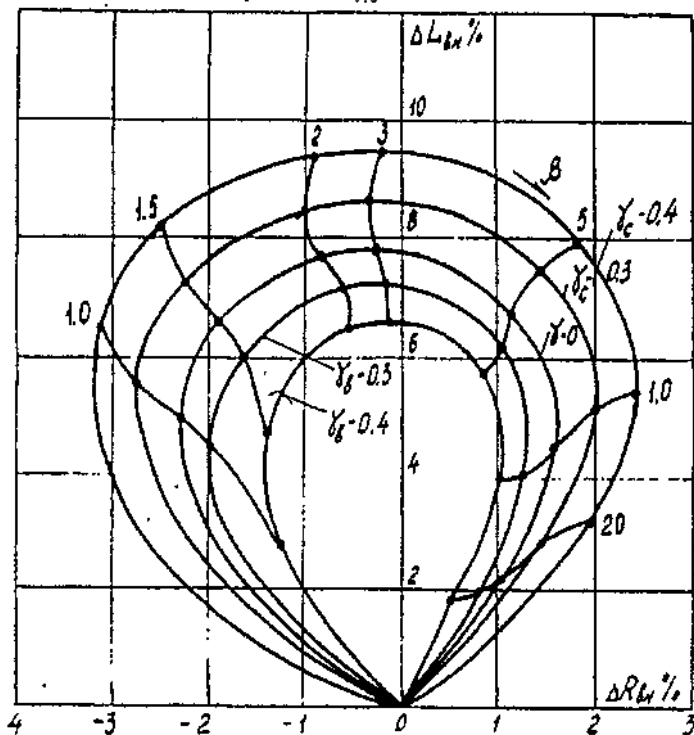


Рис. 4 Годограф изменения вносимого сопротивления МЭП при расположении трещины между двумя элементами при различных $\gamma_{\text{в}}$ и $\gamma_{\text{с}}$ для согласного и встречного включений

Четвертая глава посвящена разработке и усовершенствованию многоэлементных электромагнитных преобразователей и средств дефектоскопии.

В работе определены области оптимальных значений обобщённых параметров α , β и γ по максимуму чувствительности вносимых трещинной сопротивлений МЭП в зависимости от расстояния между элементами и даны рекомендации по выбору режима контроля, оптимальной конструкции МЭП и схемы включения их элементов.

Показано, что для дефектоскопии элементов конструкции авиационной, ракетно-космической и оборонной техники целесообразно использовать 4, 16 и 32 элементные МЭП со следующими устройствами позиционирования и ориентации чувствительных элементов - упругие гофрированные резиновые манжеты, упругие элементы с прорезями и радиальным зазором относительно каркаса, радиально упругие элементы в виде гофрированной мембраны с гасителем поперечных вибраций, устройства со ступенчатым регулированием положения катушки относительно контролируемой поверхности.

На Рис. 5 и Рис. 6 приведены 4-х и 16-ти элементные МЭП.

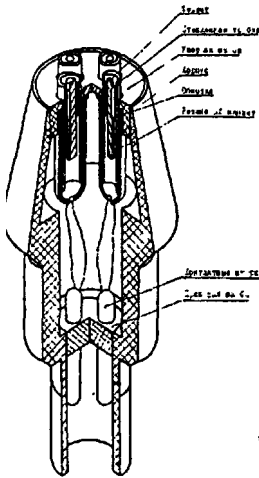


Рис. 5 Конструкция 4-х элементного МЭП

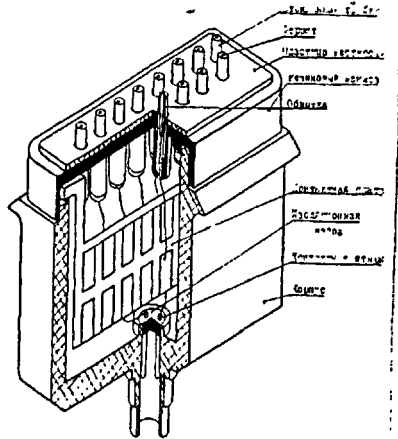


Рис. 6 Конструкция 16-х элементного МЭП

Основные технические характеристики данных конструкций МЭП:

ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫЙ МЭП

- минимальная длина выявляемой усталостной трещины
 - с дефектоскопом серии ППД, «Зонд ВД-96», ВД-89, ВД1-МЭП, мм.....1,5 - 2,5
 - с дефектоскопом типа ДЭИ-4А, ВД4-МЭП, мм.....0,5 и 1,5
- минимальная глубина выявляемой усталостной трещины, мм.....0,5
- ширина зоны контроля, мм.....4,5 и 6,5

ШЕСТНАДЦАТИЭЛЕМЕНТНЫЙ МЭП

- минимальная длина выявляемой усталостной трещины
 - с дефектоскопом серии ППД, «Зонд ВД-96», ВД-89, ВД1-МЭП, мм.....4-5
 - с дефектоскопом типа ДЭИ-4А, ВД4-МЭП, мм.....1,5 и 2,5
- минимальная глубина выявляемой усталостной трещины, мм.....0,3
- ширина зоны контроля, мм.....18 и 32

Эти МЭП могут использоваться в составе существующих дефектоскопов типа: ППД, ВД-89НМ, ВД-2НФМ, «Проба», «Фазекс», «Элотест», «МИЗ» и др., а также в разработанных в МГАПИ дефектоскопах типа «Зонд-ВД», «ВД-МЭП».

На Рис. 7 приведена структурная схема разработанного импульсного одноканального дефектоскопа «ВД1-МЭП».

Основные характеристики дефектоскопа «ВД1-МЭП»:

1. Частота тока возбуждения, МГц.....0,2±5.
2. Диаметры элементов МЭП, мм.....1,0±1,5; 2,0±2,5
3. Зазор между преобразователем и контролируемой поверхностью, мм.....0,2
4. Положение оси преобразователя относительно контролируемой поверхности, град.....90±15
5. Минимальная длина выявляемой трещины, мм.....1,5±2,0.

6. Минимальная глубина выявляемой трещины, мм $0,25 \pm 0,3$.
7. Минимально допустимая толщина объекта контроля, мм.....1,0
8. Сигнализация режимов
"зазор", "норма", "дефект".....цифровая, звуковая, световая
9. Температура окружающей среды, °С $+1,0 \pm +4,0$.
10. Относительная влажность воздуха при
температуре окружающей среды 30°С, %.....до 90
11. Питание автономное (аккумуляторы 4,5В) или сеть ~220В, 50Гц
12. Габаритные размеры, мм.....100x200x70
- П. Вес, кг.....1,5

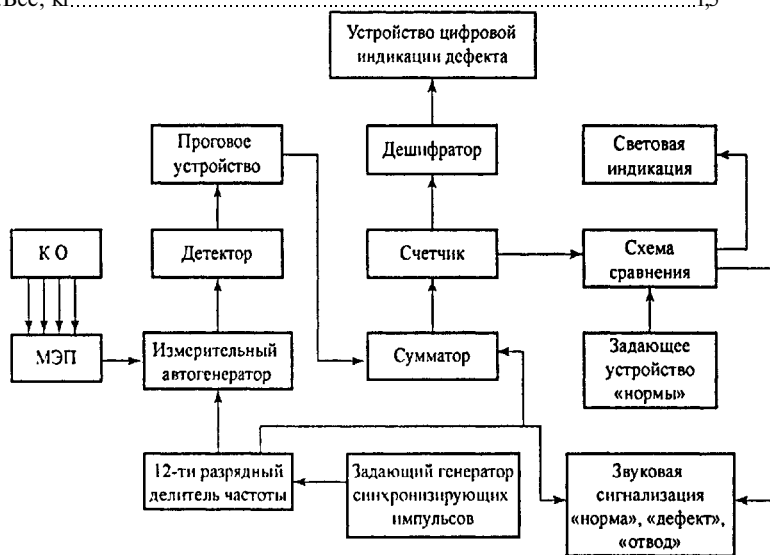


Рис. 7 Структурная схема одноканального дефектоскопа «ВД1-МЭП»

В работе также приведены структурные схемы и основные характеристики усовершенствованных приборов ВД2-МЭП для контроля сплошности основного материала деталей машиностроения, транспортного оборудования и авиационной техники на наличие подповерхностных дефектов на глубине до $4+5$ мм; ВД4-МЭП и ВД16-МЭП для повышения производительности контроля на больших площадях поверхностей обшивки самолётов и деталей сложной формы.

Промышленное апробирование разработанных МЭП и приборов в ГП "НИМИ", Российском НИИ космического приборостроения, Межотраслевом научном центре оборонных отраслей промышленности "АТАКС" и ЗАО НИИИИМ МНПО «Спектр» позволило повысить производительность и достоверность контроля, расширить области применения и функциональные возможности электромагнитных методов неразрушающего контроля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании проведённого анализа показано, что применение для неразрушающего контроля многоэлементных электромагнитных преобразователей позволяет повысить производительность и информативность контроля, расширить его функциональные возможности, увеличить точность и достоверность полученных результатов.

2. Для предложенной модели МЭП в виде N круговых контуров с переменным током, расположенных над электропроводящей средой, с помощью интегральных преобразований Фурье-Бесселя и теоремы сложения волновых цилиндрических функций получены математические выражения для расчёта векторных потенциалов электромагнитного поля и вносимых параметров при согласном и встречном включении элементов МЭП.

3. Получены формулы для расчёта составляющих плотности вихревых токов в проводящей поверхности определения вносимых трещиной параметров МЭП.

4. Разработан алгоритм расчёта и определены основные закономерности изменения вносимых параметров МЭП, распределения плотности вихревых токов в изделии в зависимости от обобщённых параметров α , β и γ , характеризующих электрофизические свойства, зазор и конструктивные размеры элементов преобразователя для различных включений их катушек.

5. Установлено, что при изменении β от 1,0 до 40 и γ от 0 до 0,5 для согласного включения катушек МЭП с увеличением расстояния между ними активная и реактивная составляющая вносимого сопротивления уменьшается, а при встречном включении - увеличивается. При малых значениях параметра $\beta < 2,5$ и $\alpha = \text{const}$ реактивная составляющая вносимого сопротивления практически не зависит от расстояния между элементами как при согласном, так и при встречном их включении. С увеличением зазора между МЭП и изделием (параметр α) максимум активной составляющей вносимого сопротивления находится в диапазонах $4 < \beta < 6$ при $\alpha = 0,1$; $3 < \beta < 5$ при $\alpha = 0,3$; и $2 < \beta < 4$ при $\alpha = 0,5$.

6. На основе диаграмм чувствительности МЭП к электропроводимости (S_a) и зазору (S_z) показано, что при согласном включении катушек чувствительность больше, чем при встречном и с изменением конструктивного параметра γ от 0,5 до 0,2 чувствительность при согласном включении уменьшается, а при встречном увеличивается.

7. Установлено, что вносимые трещиной сопротивления двухэлементных МЭП при согласном включении катушек больше, чем при встречном, если трещина проходит под центрами этих катушек, если же трещина проходит под одной катушкой, то, наоборот, вносимое сопротивление больше для встречного включения.

8. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена экспериментальными исследованиями на компьютеризированной установке «КОМВИС-М» с помощью стандартных и специальных образцов.

9. Определены области оптимальных значений обобщённых параметров α , β и γ многоэлементных преобразователей по максимуму их чувствительности к дефектам типа трещина и даны рекомендации по выбору режимов контроля и конструированию различных типов МЭП, а также схем их включения.

10. Разработано и усовершенствовано два типа дефектоскопов с МЭП - импульсный «ВД1-МЭП», 4-х и 16-ти каналные дефектоскопы (ВД4- МЭП и ВД16- МЭП) с высокой производительностью и информативностью контроля, позволяющие также определять размеры, количество трещин и их рост в процессе эксплуатации.

11. Разработанные МЭП и приборы успешно прошли опытно промышленное использование при контроле ответственных элементов и узлов авиакосмической и оборонной техники на ряде предприятий (ГП «НИМИ», «АТАКС», МНПО «Спектр»).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Тынянский А.А., Исаев А.А. Расчет эл. магн. поля многоэлементных преобразователей. Кн. «Приборостроение» (ч2) Труды VI Международной научно - практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права». М. 2003. с 16- 19.

2. Тынянский А.А. Определение вносимых параметров многоэлементных электромагнитных преобразователей. Кн. «Приборостроение» (ч2). Труды VI Международной научно - практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права». М. 2003. с 13 - 16.

3. Тынянский А.А. Определение выходных сигналов МЭП от дефектов типа трещина в металлоизделиях. Кн. «Приборостроение» (ч. 2). Труды VII Международной научно - практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права». М. 2004. с 8-14.

4. Тынянский А.А. Математическая модель преобразования сигнала МЭП при контроле дефектов электрофизических свойств в металлах. Кн. «Приборостроение» (Межвузовский сборник научных трудов)., М., 2004., с. 187-194.

5. Тынянский А.А., Абрамов М.В. Расширение области применения проходных ВТП. Программа конференции и доклады 3-й Международной, выставки и конференции «Не разрушающий контроль и диагностика в промышленности», М., 2004., с. 116-117.

6. Тынянский А.А., Ивченко А.В. Синтез электромагнитных преобразователей для дефектоскопии зон промышленной неоднородности металла. Программа конференции и доклады 3-й Международной выставки и конференции «Не разрушающий контроль и диагностика в промышленности», М., 2004., с. 118-119.

7. Тынянский А.А. Многоэлементные электромагнитные преобразователи. «Вестник МГАПИ», М., 2004, с 177-182.

8. Тынянский А.А. Четырёх и шестнадцатиканальные дефектоскопы ВД4-МЭП и ВД16-МЭП. «Вестник МГАПИ», М., 2004, с 182-186.

Подписано в печать 14.01.2005г. Формат60.\84.1/16 Отпечатано на ризографе Бумага офсетная
Усл печ л 1.0 тираж 100 экз Заказ 6.

Отпечатано в РИО Московской государственной академии приборостроения и информатики
107846, Москва, ул Стрмынка 20

05.09 - 05.11



22 АПР 2005

1328