

На правах рукописи

Масалджийски Милко Роков

Электромагнитные многофункциональные преобразователи систем  
автоматизации управления и контроля сортировкой изделий

05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем  
управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Харьков – 1993

718211  
Работа выполнена на кафедре " Измерительно - информационная техника " Харьковского политехнического института

Научный руководитель - доктор технических наук , профессор Себко В. П.

Официальные опоненты - доктор технических наук , профессор Корсунов Н. И. , кандидат физико-математических наук , научный сотрудник Тюпа В. И.

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение " Метрология " , г. Харьков

Защита состоится 1 июля 1993 г. в 1430 час. на заседании специализированного совета Д 068.39.02 в Харьковском политехническом институте ( 310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21 ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского политехнического института .

Автореферат разослан " 12 " июня " 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Кизиллов В. У.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00753664 (V)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время использование автоматизированных систем управления и контроля технологическими процессами требует надежных, высокочувствительных, многопараметровых и точных устройств. Особый практический интерес представляет разработка и исследование автоматизированных приборов и устройств для определения геометрических и электромагнитных параметров цилиндрических проводящих изделий, поскольку по этим параметрам можно определить связанные с ними такие физико-механические величины как прочность, твердость, температура, химический состав. Особое место среди бесконтактных и неразрушающих методов, позволяющих производить автоматизированный контроль качества продукции, занимает метод вихревых токов. Он позволяет контролировать как электрофизические характеристики деталей, так и их геометрические параметры. Значительное место среди ассортимента продукции выпускаемой промышленностью занимают цилиндрические проводящие изделия (прутки, трубы, заготовки, оси и пр.).

Основными характеристиками, несущими информацию о состоянии кристаллической структуры исследуемых объектов, являются относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельная электрическая проводимость (электропроводность)  $\sigma$ . По величинам последних можно судить о химическом составе материала, о степени его чистоты. Относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельная электрическая проводимость  $\sigma$  связаны с соотношением доминирующих примесей углерода и кремния в конструкционных и электротехнических сталях. Это позволяет использовать метод вихревых токов для целей разбраковки сталей по маркам. Различные виды обработок (механическая, химическая, термическая, сварка, резка, шлифование и пр.), которым подвергаются изделия, по-разному влияют на величину и распределение  $\mu_r$  и  $\sigma$ . Поэтому, особо важным достоинством метода вихревых токов является возможность одновременного измерения  $\mu_r$  и  $\sigma$  на различных глубинах, в зависимости от частоты зондирующего поля. Это обстоятельство дает возможность судить о таких важных характеристиках деталей, как глубина слоя цементации или азотирования, степень закалки и пр.

Особый практический интерес представляет использование измерения двух параметров изделия для целей сортировки изделий по маркам материала и геометрическим параметрам. К настоящему времени были

известны работы, в которых описывалась разбраковка по  $\mu$  и  $\sigma$ . Однако результаты этих работ имели отношение к электромагнитным параметрам специальных образцов, а не к их материалу. Все это приводило к слабой разрешающей способности и низкой точности устройств для разбраковки. Поэтому возникла важная для практики задача осуществления сортировки изделий, не по  $\mu$  и  $\sigma$  образца, а по электромагнитным параметрам материала. Кроме того, для расширения функциональных возможностей таких устройств, необходимо было рассмотреть сортировку немагнитных образцов по геометрическим и электромагнитным параметрам.

На результирующий сигнал измеренный методом вихревых токов влияют не только относительная магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость, но и размеры исследуемого изделия, размеры катушек измерительного преобразователя и их взаимное расположение. Эта связь позволяет измерять и геометрические параметры образца, что в ряде случаев имеет особую практическую значимость.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование электромагнитных преобразователей систем контроля и управления технологическими процессами изготовления и эксплуатации материалов, изделий, конструкций по допустимым их значениям магнитных, электрических и геометрических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

- разработать и исследовать электромагнитный метод и средства для идентификации различных изделий по маркам материала при одновременном контроле двух параметров изделия (магнитной проницаемости и удельной электропроводности ферромагнитных материалов и удельной электропроводности и радиуса немагнитных изделий);

- с целью расширения пределов измерения двух параметров ферромагнитных изделий рассмотреть возможность совместного контроля магнитных прутков конечных длин (и длин преобразователя) с учетом размагничивающего фактора;

- разработать и исследовать электрические схемы для контроля двух параметров с целью сортировки изделий по их маркам на основе использования трансформаторных и параметрических преобразователей;

- создать методику оценки погрешностей контроля магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий конечных длин;

- разработать способы и устройства для улучшения основных

характеристик электромагнитных преобразователей ;

- выяснить поведение погрешностей измерений параметров изделий и разброс характеристик изделий при переходах к разным маркам материала ;

- построить математическую модель процесса распознавания прутков по маркам материала на основе вероятностного подхода ;

- разработать алгоритмы и функциональные схемы автоматизированных систем и устройств , позволяющих на основе двухпараметрового контроля управлять процессом качественного изготовления цилиндрических прутков, проволок, заготовок , труб и других деталей , а также осуществлять сортировку изделий по маркам материала .

Методы исследования базируются на использовании теории электромагнитного поля , электродинамики сплошных сред , теории электрических и магнитных цепей , аппарата специальных функций , теории вероятностей , дифференциального и интегрального исчисления , теории погрешностей .

Научная новизна результатов работы состоит в следующем :

- предложены и исследованы бесконтактные неразрушающие методы и устройства для совместного определения магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости вещества образца с учетом конечных длин изделия и электромагнитного преобразователя ;

- разработана модификация этого метода применительно к сортировке немагнитного изделия по радиусу и электропроводности ;

- создана методика оценки погрешностей измерений магнитной проницаемости , удельной электрической проводимости и радиуса изделий с учетом размагничивающего фактора, возникающего из-за конечных длин преобразователя и изделия .

- построена математическая модель процесса идентификации тех или иных изделий к соответствующим им маркам материала на основе вероятностного подхода ;

- разработаны алгоритмы и функциональные схемы систем , позволяющих на основе двухпараметровых измерений управлять процессами изготовления ферромагнитных и немагнитных проволок , прутков заготовок , изделий под крепеж и др. по допустимым значениям магнитных, электрических и геометрических параметров.

Практическая ценность работы состоит в том , что разработанные многопараметровые электромагнитные методы и реализующие их преобразователи позволяют в существенной мере расширить функциональные

возможности автоматизированных систем управления и контроля за счет возможности измерения электромагнитных параметров сравнительно коротких образцов ( $l/d \approx 15...20$ , где  $l$  и  $d$  - длина и диаметр образца), одновременного измерения электромагнитных и геометрических параметров одним датчиком, повышения точности и быстродействия за счет использования обобщенных функций преобразования, позволяющих упростить процесс автоматизации контроля, возможности оценки погрешности измерений при использовании полученных соотношений, автоматизации контроля прутковых изделий на различных стадиях технологических циклов их изготовления и эксплуатации. Разработанные методы расширяют класс решаемых задач в области измерений электрических магнитных и физико-механических свойств изделий (таких, как химический состав, прочность, твердость, температура). Они дают возможность осуществлять ранжирование списка сортируемых материалов с целью обеспечения надежной идентификации марки материала.

Реализация и внедрение результатов работы. Работа выполнена в соответствии с госбюджетной тематикой (1992, 1993 гг, тема № 7729 ГКНТ Украины направление 6.7.1. Аналитическое приборостроение). Разработанные электромагнитные многофункциональные преобразователи и автоматизированные устройства найдут широкое применение при контроле физико-механических параметров цилиндрических изделий, прутков, труб, заготовок, образцов в процессе изготовления и эксплуатации материалов, изделий и конструкций на Сталелитейном заводе г. Раковски, Институте цветных металлов г. Пловдива, заводе асинхронных двигателей г. Пловдива (Р. Болгария) и др.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- Всесоюзной научно-технической конференции "Неразрушающие физические методы контроля" - Свердловск 1990 г.
- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ХПИ (1992, 1993 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 120 страницах машинописного текста, перечня используемой литературы из 88 наименований и приложений на 71 страницах. Работа иллюстрирована 21 рисунком и 4 таблицами.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследований, отмечена практическая направленность работы, приведена ее структура и сформулированы основные положения выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены оптические, спектрометрические термоэлектрические и электромагнитные методы и устройства контроля параметров изделий. Изложены существующие методы и средства сортировки сталей по маркам. На основании критического обзора существующих методов и устройств контроля выделены актуальные вопросы теоретических и экспериментальных исследований по разработке автоматизированных устройств для рассортировки образцов и изделий по маркам материала. Выяснены области применения электромагнитных методов и устройств для контроля параметров изделий. Сделан вывод о том, что наиболее приемлим и перспективным для экспресс-сортировки сталей является использование электромагнитных преобразователей, имеющих высокое быстродействие, широкопредельность, надежность, длительный срок службы, способность работать в заводских условиях. Показаны преимущества применения неразрушающих электромагнитных методов и преобразователей для разбраковки изделий и проанализированы причины, сдерживающие их развитие. В конце главы сделан выбор направления исследования и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе получены основные теоретические соотношения, описывающие работу вихретоковых преобразователей. Дана методика измерения параметров вещества  $\mu_r$  и  $\sigma$  с учетом размагничивающего фактора для образцов, длиннее или короче длины катушки параметрического преобразователя. Разбраковка изделий осуществляется по найденным параметрам вещества. Предложена методика и получены основные соотношения для измерения параметров вещества трансформаторным вихретоковым преобразователем, по которым производится сортировка образцов. Найдены основные соотношения для измерения радиуса и электропроводности цилиндрического изделия параметрическим и трансформаторным вихретоковыми преобразователями. Рассмотрены пути повышения точности и разрешающей способности измерения параметров вещества за счет компенсации воздушного зазора, использования треугольника напряжений для измерения малых углов и получения независимых универсальных функций преобразования для ускорения вычис-

ления  $\mu_r$  и  $\sigma$  в параллельных циклах. Приведены экспериментальные результаты разбраковки сталей по маркам с использованием параметрического датчика с учетом коэффициента размагничивания. Получены экспериментальные результаты измерения параметров массивных образцов.

Для параметрического проходного электромагнитного преобразователя с длинным образцом реализация метода сортировки сводится к следующему:

- по измеренным значениям сопротивления  $R_0$  и индуктивности  $L_0$  катушки без образца и с образцом  $R_1$ ,  $L_1$  при известных диаметрах катушки и образца  $d_k$ ,  $d_{обр}$ , частоте  $\omega$  зондирующего поля, рассчитывают тангенс угла сдвига фазы удельного нормированного магнитного потока  $k$  в изделии:

$$\operatorname{tg} \varphi = (R_1 - R_0) / \omega [L_1 - (1 - \eta) L_0] \quad (1)$$

где  $\eta = d_{обр}^2 / d_k^2$  - коэффициент заполнения преобразователя;

- по вычисленному  $\operatorname{tg} \varphi$  из предварительно рассчитанного массива точек функций преобразования ( $\operatorname{tg} \varphi = f(x)$ ), находят обобщенный параметр  $x$ . Связь между  $x$  и  $\operatorname{tg} \varphi$  осуществляется по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{ber}_{1x} (\operatorname{ber}_{0x} + \operatorname{bei}_{0x}) + \operatorname{ber}_{1x} (\operatorname{ber}_{0x} - \operatorname{bei}_{0x})}{\operatorname{ber}_{1x} (\operatorname{ber}_{0x} - \operatorname{bei}_{0x}) - \operatorname{ber}_{1x} (\operatorname{ber}_{0x} + \operatorname{bei}_{0x})} \quad (2)$$

- далее определяют удельный нормированный поток (величину  $k$ ) из массива  $k = f(x)$  который получают, используя формулу

$$k = \frac{2}{x} \sqrt{\frac{\operatorname{ber}_{1x}^2 + \operatorname{bei}_{1x}^2}{\operatorname{ber}_{0x}^2 + \operatorname{bei}_{0x}^2}} \quad (3)$$

- затем рассчитывают нормированный магнитный поток  $\Phi_n$  по формуле

$$\Phi_n = \frac{1}{\omega L_0} \sqrt{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta) L_0]^2} \quad (4)$$

- находят магнитную проницаемость тела  $\mu_{rl}$  контролируемого образца:

$$\mu_{rl} = \Phi_n / \eta k \quad (5)$$

- используя связь между магнитными проницаемостями тела  $\mu_{т}$  и вещества  $\mu_{в}$  при известном коэффициенте размагничивания  $N$ , определяют начальную магнитную проницаемость вещества образца

$$\mu_{в} = \mu_{т} (1 - N) / (1 - N \mu_{т}) \quad (6)$$

Для параметрического проходного преобразователя с длинным образцом (больше длины катушки)  $N$  равен дроссельному коэффициенту размагничивания  $N_{д}$ , учитывающему усреднение электрофизических параметров образца на длине катушки

$$N_{д} = (2.72 I_{к\lambda} - 0.69) / \lambda^2 \quad (7)$$

$$\lambda = I_{к} / d_{обр} \quad (8)$$

где  $I_{к}$  - длина катушки.

- потом рассчитывают электропроводность тела образца по формуле

$$\sigma_{т} = 4 \chi^2 / \mu_{о} \mu_{т} \omega d_{обр}^2 \quad (9)$$

- и наконец находят электропроводность вещества образца по формуле:

$$\sigma_{в} = \mu_{в} \sigma_{т} / \mu_{т} \quad (10)$$

Для того чтобы осуществить сортировку материалов по маркам, необходимо получить сведения об электропроводности и магнитной проницаемости всех сортируемых материалов. Результаты расчета магнитной проницаемости вещества образца и его электропроводности наносят с учетом величины ошибки измерения на диаграмму расположения отдельных сортируемых материалов в координатах магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости вещества. Исследуемый материал относят (причисляют) к той или другой марке в зависимости от того, в какой области или ближе к какой располагаются его электрофизические параметры. Такое представление результатов позволяет провести наглядную ранжировку списка сортируемых материалов, исключив из списка те материалы, которые имеют сильно перекрывающиеся области разброса электрофизических параметров. Частичное перекрытие областей разброса начальной магнитной проницаемости и удель-

ной электрической проводимости возможно как из-за непостоянства технологии, так и из-за ошибок измерения этих параметров.

Важным для практики является вопрос измерения электромагнитных параметров коротких образцов. Задача определения магнитной проницаемости тела и электропроводности для случая, когда изделие длиннее катушки, решена и освещена подробно в литературе. Для параметров преобразователя с образцом можно записать:

$$R_1 = R_0 + L_0 \omega \eta \mu_{r1} K \sin \varphi \quad , \quad (11)$$

$$L_1 = L_0 \left[ (1 - \eta) + \eta \mu_{r1} K \cos \varphi \right] \quad , \quad (12)$$

Рассмотрим определение параметров вещества для случая, когда образец короче катушки, т.е. он полностью входит в нее. Будем исходить из предположения, что изделие оказывает практически влияние только на витки, находящиеся непосредственно под ним. В таком случае измерительный преобразователь можно образно представить, как бы состоящий из двух частей: пассивную - на которую изделие практически не влияет и активную - на чьи параметры образец оказывает воздействие. Если параметры катушки распределены равномерно по ее длине, то для активного сопротивления  $R_{II}$  и индуктивности  $L_{II}$  пассивной части можно записать:

$$R_{II} = R_0 \left[ 1 - l_{обр} / l_K \right] \quad , \quad (13)$$

$$L_{II} = L_0 \left[ 1 - l_{обр} / l_K \right] \quad , \quad (14)$$

Имея ввиду выражения (11) - (14) для активного сопротивления и индуктивности преобразователя с образцом можно записать:

$$R_1 = R_0 + L_0 l_{обр} \omega \eta \mu_{r1} K \sin \varphi / l_K \quad , \quad (15)$$

$$L_1 = L_0 - L_0 l_{обр} \eta \left[ 1 + \mu_{r1} K \cos \varphi \right] / l_K \quad , \quad (16)$$

Из выражений (15) и (16) определим, чему равен  $\tan \varphi$  и  $\Phi_H$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_1 - R_0}{\omega \left[ L_1 - L_0 \left( 1 - \eta \frac{1_{\text{обр}}}{1_K} \right) \right]} \quad (17)$$

$$\Phi_H = \frac{1}{\omega L_0 \frac{1_{\text{обр}}}{1_K}} \sqrt{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 \left[ L_1 - L_0 \left( 1 - \eta \frac{1_{\text{обр}}}{1_K} \right) \right]^2} \quad (18)$$

Для определения магнитной проницаемости тела и его удельной электрической проводимости сначала вычисляют по формуле (17) значение  $\operatorname{tg} \varphi$ , а по нему из таблиц массива  $\operatorname{tg} \varphi = f(x)$  находят обобщенный параметр  $x$ . Значение обобщенного параметра  $x$  используют для определения удельного нормированного потока  $k$  из массива  $k = f(x)$ , который вычисляют по формуле (3). Зная геометрические и электрические параметры преобразователя без образца и с образцом находят  $\Phi_H$  - нормированный магнитный поток. Далее определяют магнитную проницаемость тела по формуле (5) и электропроводность тела по формуле (9). Для нахождения магнитной проницаемости вещества образца необходимо определить коэффициент размагничивания. Так как образец полностью входит в преобразователь, в качестве коэффициента размагничивания необходимо брать магнитометрический коэффициент размагничивания, учитывающий усреднение магнитной проницаемости по всей длине образца. С большой точностью можно считать, что магнитометрический коэффициент размагничивания стержневого сердечника практически равен коэффициенту размагничивания эллипсоида с тем же  $\lambda$ .

$$N_B = (1 - \gamma^2) \left( \operatorname{arth}(\gamma) - \gamma \right) / \gamma^3 \quad (19)$$

где  $\gamma = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ ;  $a$  и  $b$  это соответственно большая и малая полуось эллипсоида.

Рассмотренный выше параметрический проходной преобразователь несмотря на простоту в изготовлении и эксплуатации, имеет ряд недостатков. Температурная погрешность является одна из самых значительных среди них.

Малые абсолютные приращения активного сопротивления, особенно

при малых значениях обобщенного параметра ( $\chi < 1$ ), требуют тщательной термоизоляции преобразователя как от действия окружающей среды, так и от влияния температуры контролируемого изделия. Причем требование хорошей термоизоляции входит в противоречие с необходимостью практически полного заполнения датчика объектом контроля, что является обязательным условием уменьшения погрешностей измерений электрофизических и геометрических параметров изделия.

Э. д. с. вторичной обмотки трансформаторного преобразователя зависит как от электромагнитных свойств материала изделия, помещаемого в датчик, так и от воздушного зазора между обмоткой и изделием, а также частоты питающего тока. Очевидно, при определении параметров материала изделия в продольных полях полезная информация заключается в э. д. с.  $E_2$  обусловленной потоком  $\Phi$  в изделии. Что же касается части результирующей э. д. с.  $E_1$ , связанной с потоком в зазоре, то она является в данном случае фактором мешающим. Поток в изделии может быть соизмерим и даже значительно меньше потока в зазоре, что приводит к определенным трудностям при выделении полезного сигнала на фоне большой помехи. С целью повышения точности измерения  $\mu_r$  и  $\sigma$  материала изделия величину  $E_1$  можно скомпенсировать, при этом выражения для  $\text{tg}\varphi$  и  $\Phi_H$  существенно упрощаются. В таком случае  $E_1 \rightarrow 0$  и, следовательно,  $\eta \rightarrow 1$ . При этом

$$\Phi_H = E_p / E_0^* \quad ; \quad (20)$$

$$\text{tg}\varphi = \text{tg}\varphi_0 \quad , \quad (21)$$

где  $E_0^*$  - э. д. с. преобразователя без изделия при наличии компенсации;  $E_p$  - результирующая (суммарная) э. д. с. вторичной обмотки датчика с образцом при использовании компенсации. Ток в первичной цепи в процессе измерения поддерживается постоянным. Компенсация воздушного зазора в трансформаторном электромагнитном преобразователе соответствует условному переносу измерительной обмотки на поверхность изделия. Для осуществления компенсации использована катушка переменной взаимной индуктивности (вариопетр), первичная обмотка которой включена последовательно - согласно с намагничивающей обмоткой датчика, а вторичная - встречно с измерительной обмоткой датчика. При определении параметров вещества необходимо учитывать центральный (баллистический) коэффициент размагничивания

$$N_{\text{ц}} = (2.01 \ln \chi - 0.46) / \chi^2 \quad , \quad (22)$$

Такой переход от измеренных параметров тела к параметрам вещества весьма эффективен при проведении экспресс - анализа химического состава вещества , отработке технологий изготовления изделий , сортировке сталей .

Рассмотренные выше методы сортировки изделий по маркам материала осуществляются в последовательном цикле : сначала определяют  $\mu_{rl}$  , а затем  $\sigma_l$  . Для того чтобы упростить процесс определения параметров тела и осуществить независимое одновременное определение  $\mu_{rl}$  и  $\sigma_l$  вводят другие универсальные функции преобразования  $k = f_1(t_{\text{эф}})$  и  $N_x = f_2(t_{\text{эф}})$  . При этом  $N_x = k x^2$  . Параметр  $N_x$  характеризует удельный нормированный поток , пронизывающий единичную площадку в слое на глубине проникновения поля в образец . Тогда определение параметров тела сводится к следующей процедуре :

- по измеренным параметрам преобразователя с образцом и без образца определяют  $t_{\text{эф}}$  ;
- по  $t_{\text{эф}}$  определяют удельный нормированный поток  $k$  и  $N_x$  из функций  $k = f_1(t_{\text{эф}})$  и  $N_x = f_2(t_{\text{эф}})$  ;
- определяют магнитную проницаемость тела по формуле ( 5 ) , а электропроводность тела из выражении

$$\sigma_l = 4 N_x / \mu_0 \Phi_n \omega d_{\text{пр}}^2 \quad , \quad ( 23 )$$

Использование зависимостей  $k = f_1(t_{\text{эф}})$  и  $N_x = f_2(t_{\text{эф}})$  позволяет существенно ускорить процесс разбраковки .

Были проведены эксперименты по сортировке изделий с использованием как параметрических , так и трансформаторных датчиков . В экспериментах сортировались цилиндрические образцы различных сталей - 20 , 40 , 45 , 40X , 38ХС с  $d = 10$  мм и  $l = 250$  мм . В результате проведенного эксперимента по определению  $\mu_B$  и  $\sigma_B$  различных марок сталей построена диаграмма , на которой местонахождение каждой из них определено в координатах  $\mu_B$  и  $\sigma_B$  этии двумя параметрами . Из диаграммы ( см. рисунок ) видно , что области , соответствующие большинству марок сталей , не перекрываются , при этом надежность разбраковки по маркам стали увеличивается .

Необходимость одновременного определения радиуса и электропроводности возникает , когда пределы измерения контролируемых параметров достаточно широки и в связи с этим затруднена отстройка

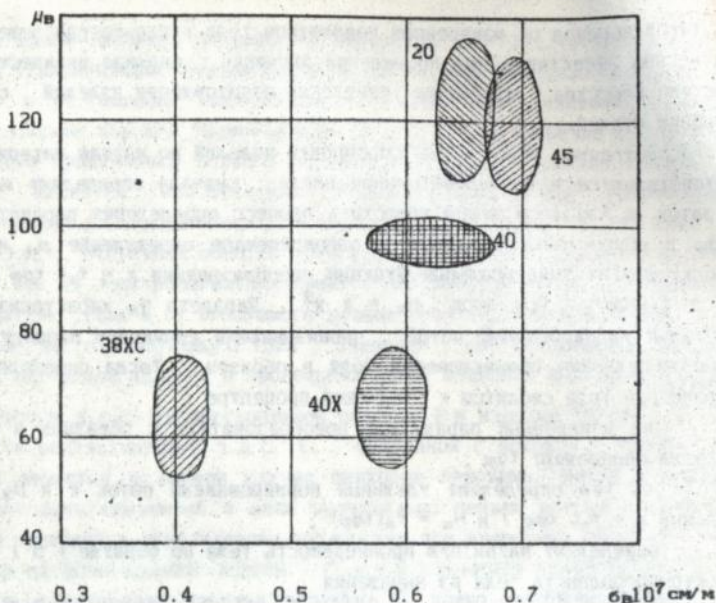


Рис. 1

одного параметра от другого или заранее не известен диаметр изделия (например из-за диэлектрических покрытий) или при повреждениях наружной поверхности (к примеру, рыхлый слой окислов) и пр.

При использовании мостовой схемы более выгодно измерять не абсолютные величины сопротивления и индуктивности датчика, а их приращения. Для одновременного определения радиуса и удельной электрической проводимости немагнитных изделий удобно ввести безразмерный параметр  $M_n$ , характеризующий удельное внесистемное нормированное сопротивление преобразователя. Выражения для модуля и фазы этого параметра имеют вид

$$M_n = Z_{вн} / \omega L_0 \eta = \sqrt{(1 - \text{Re } \dot{K})^2 + (\text{Im } \dot{K})^2} \quad (24)$$

$$\text{tg } \varphi_{вн} = X_{вн} / R_{вн} = (1 - \text{Re } \dot{K}) / \text{Im } \dot{K} \quad (25)$$

где  $\text{Re } \dot{K}$  и  $\text{Im } \dot{K}$  - реальная и мнимая части параметра  $\dot{K}$ ;  $Z_{\text{ВН}}$ ,  $X_{\text{ВН}}$ ,  $R_{\text{ВН}}$  - вносимые значения полного электрического сопротивления и его активной и реактивной частей;  $\varphi_{\text{ВН}}$  - угол сдвига по фазе  $Z_{\text{ВН}}$  от  $R_{\text{ВН}}$ . Значения  $\text{Re } \dot{K}$  и  $\text{Im } \dot{K}$  можно вычислить, исходя из выражений

$$\text{Re } \dot{K} = K \cos \varphi \quad (26)$$

$$\text{Im } \dot{K} = K \sin \varphi \quad (27)$$

Измерив значения  $R_{\text{ВН}}$  и  $L_{\text{ВН}}$  ностовой схемой, находят величины

$$Z_{\text{ВН}} = \sqrt{R_{\text{ВН}}^2 + X_{\text{ВН}}^2} \quad (28)$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{ВН}} = X_{\text{ВН}} / R_{\text{ВН}} \quad (29)$$

где  $X_{\text{ВН}} = \omega L_{\text{ВН}}$ . Затем по величине  $\text{tg } \varphi_{\text{ВН}}$  находят, пользуясь зависимостями  $M_{\text{ж}} = f(\text{tg } \varphi_{\text{ВН}})$  и  $X = f(\text{tg } \varphi_{\text{ВН}})$ ; параметры  $M_{\text{ж}}$  и  $X$  Радиус изделия определяют исходя из соотношения (24).

$$a = a_{\text{п}} \sqrt{(Z_{\text{ВН}} / \omega L_0 M_{\text{ж}})} \quad (30)$$

где  $a$  - радиус образца;  $a_{\text{п}}$  - радиус преобразователя;  $\omega$  - круговая частота;  $L_0$  - индуктивность преобразователя без изделия. Электропроводность находят по формуле (9) ( $\mu_{\text{рт}} = 1$ ).

В третьей главе получены соотношения для расчета предельных погрешностей измерения магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости для параметрического и трансформаторного датчиков с компенсацией эффектов зазора и учетом коэффициентов размагничивания. Установлено, что относительные погрешности измерения  $\mu_{\text{в}}$  и  $\sigma_{\text{в}}$  зависят от параметров исследуемого материала образцов, то есть зависимости погрешностей от обобщенного параметра  $x$  не являются универсальными. Приведен в качестве примера результаты измерений  $\mu_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$  и их погрешностей для трансформаторного датчика с диаметром 12 мм, длина образца 320 мм, диаметром 8 мм. Э.д.с. преобразователя без изделия 58 мВ, компенсированная э.д.с. с образцом 970 мВ, фаза нормированного потока  $24.55^\circ$ , частота намагничивающего тока 50 Гц. При этом задавались погрешностями измерения геометрических параметров  $\gamma_1 \approx \gamma_d \approx \gamma_{\text{лп}} \approx \gamma_{\text{дп}} \approx 0.2\%$ , погрешности измерения переменных

э.д.с. составляла 0.5 %, фазы - 0.2 %, частоты - 0.1 %. Результаты расчетов : магнитная проницаемость тела - 100.8 ; магнитная проницаемость вещества образца 121 ; электропроводность вещества  $7.833 \cdot 10^6$  см / м ; погрешность определения магнитной проницаемости вещества составила 0.955 %, а погрешность измерения электропроводности вещества - 2.052 %. Измерение проводилось в оптимальной по погрешностям области изменения обобщенного параметра  $x - 2.0315$ , центральный коэффициент размагничивания составил 0.001725.

Получены формулы для расчета предельных погрешностей измерения радиуса  $a$  и электропроводности для трансформаторного преобразователя. Они выражаются формулами:

$$\gamma_a = k \sqrt{(\gamma_{ап})^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{евн}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{ео}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} C_N \gamma_\phi\right)^2}, \quad (31)$$

$$\gamma_\sigma = k \sqrt{(2 \gamma_{ап})^2 + (\gamma_{евн})^2 + (\gamma_{ео})^2 + (C_\sigma \gamma_\phi)^2 + (\gamma_\omega)^2}, \quad (32)$$

где  $\gamma_a$ ,  $\gamma_\sigma$ ,  $\gamma_{ап}$ ,  $\gamma_{евн}$ ,  $\gamma_{ео}$ ,  $\gamma_\phi$ ,  $\gamma_\omega$  - относительные погрешности параметров, соответствующие индексам при погрешностях, характерные значения которых определяются в основном классами точности используемых измерительных приборов;  $C_N$ ,  $C_\sigma$  - коэффициенты влияния, зависящие от крутизны функций преобразования. Анализ точностных характеристик устройств для совместных измерений  $a$  и  $\sigma$  показывает, что погрешности  $\gamma_a$  и  $\gamma_\sigma$  определяются значением обобщенного параметра и относительными погрешностями измерительных приборов. Следовательно, кривые погрешностей универсальны и при заданных значениях относительных погрешностей измерительной аппаратуры могут быть использованы для определения погрешностей измерения двух параметров изделий с любыми значениями радиусов и удельной электрической проводимости. Так как изменение этих величин на фиксированной частоте приводит к изменению обобщенного параметра  $x$ , а следовательно, и к изменению погрешности измерения, то изменяя частоту внешнего магнитного поля, можно задавать рациональные режимы работы вихрековых устройств для достижения малых погрешностей. Следует отметить, что определение погрешностей измерения двух параметров ( $\mu$  и  $\sigma$ , или  $a$  и  $\sigma$ ) осуществлялось по методике расчета погрешностей косвенных и совокупных измерений.

В третьей главе доказана эффективность практического использо-

вания параметрических алгоритмов вероятностной классификации в задаче разбраковки образцов различных марок сталей и проверена программа ранжирования марок сталей по степени увеличения вероятности правильной классификации.

Эксперимент показал, что в отдельных случаях существует значительный разброс в  $\mu_j$  и  $\sigma_j$  даже в пределах одной марки стали при одних и тех же геометрических размерах прутковых образцов. Последнее неизбежно приводит к пересечению областей классифицируемых марок сталей (в системе координат  $\mu_j, \sigma_j$ ), что снижает вероятность правильной разбраковки исследуемых образцов.

В качестве алгоритма вероятностной классификации был выбран наиболее используемый в литературе при параметрической классификации метод максимального правдоподобия. При минимуме априорной информации этот метод наиболее эффективен и не требует большого объема памяти ЭВМ. Поскольку реальные объемы обучающих выборок (количества образцов известных марок сталей) невелики и не превышают 20 - 25 реализаций по каждому классу, то имеет смысл вычислять лишь два момента (среднее  $m$  и дисперсию  $D$ ) признаков. Коэффициент правдоподобия вычислялся по формуле

$$L_{jk} = \frac{1}{2\pi \sqrt{D_{\mu k}^* D_{\sigma k}^*}} \text{EXP} - \frac{1}{2} \left[ \frac{(\mu_j - m_{\mu k}^*)^2}{D_{\mu k}^*} + \frac{(\sigma_j - m_{\sigma k}^*)^2}{D_{\sigma k}^*} \right] \quad (33)$$

где  $m_{\mu k}^*$ ,  $D_{\mu k}^*$ ,  $m_{\sigma k}^*$ ,  $D_{\sigma k}^*$  - математические ожидания и дисперсии магнитной проницаемости и электропроводности  $k$ -той марки стали;  $\mu_j$  и  $\sigma_j$  - измеренные значения магнитной проницаемости и электропроводности классифицируемой стали. Марка стали классифицировалась по максимуму  $L_{jk}$ .

Разработана методика определения минимально допустимого объема обучающей выборки при определенных вероятностях правильной классификации для бесконечно большой обучающей и тестовой выборки  $P_c$ , доверительной вероятности и процента ухудшения максимально достижимой вероятности распознавания  $\gamma$ .

В четвертой главе даны подходы к проблеме выбора структурной схемы автоматизированного устройства для сортировки сталей на основе анализа информационных процессов в нем. Дано описание программы.

предназначенной для сбора статистической информации по  $H_B$  и  $\sigma_B$  и осуществления сортировки различных парок сталей. Программа реализует метод измерения параметров вещества как для параметрического, так и для трансформаторного преобразователя с применением компенсации эффектов воздушного зазора. Дано описание устройства для контроля и управления процессом изготовления цилиндрических изделий на базе управляюще - вычислительного комплекса «Микродат» с применением стандартной измерительной аппаратуры - вольтметр, частотомер, фазометр, генератор синусоидального напряжения. Показаны достоинства такого подхода построения автоматизированного устройства - возможность независимого тестирования и эксплуатации применяемых приборов и узлов, относительно небольшие расходы на проектирование. Разработана функциональная схема автоматизированного устройства на базе ПЭВМ. Описаны подробно функции и параметры составляющих его блоков. Сделан сравнительный анализ двух разработанных устройств, указаны преимущества автоматизированного устройства, построенного на базе ПЭВМ. Результаты проведенных экспериментов и их обработка с помощью программы (приложение 5) показали, что идеи заложенные при разработке нового автоматизированного вихретокового устройства для сортировки материалов по маркам достоверны и осуществимы на практике.

В заключении кратко изложены основные результаты диссертационной работы.

В приложении даны исходные тексты некоторых программ, которые использовались в процессе работы над диссертацией, а также таблицы с результатами расчетов обобщенных функций преобразования параметрического и трансформаторного преобразователей. Приводится также данные по расчету коэффициентов размагничивания цилиндрических образцов. Материалы приложения дополняют, углубляют и конкретизируют результаты диссертации.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании существующих методов и устройств для определения электрических магнитных и геометрических параметров изделий решена важная задача создания методов, алгоритмов работы многопараметровых электромагнитных преобразователей, позволяющих в существенной мере расширить функциональные возможности систем управления и контроля.
2. Предложены и исследованы бесконтактные неразрушающие методы и устройства для совместного определения двух параметров изделий с

учетом конечных длин изделия и преобразователя . Создан надежный двухпараметровый метод для определения принадлежности того или иного магнитного изделия к марки его материала . Разработана модификация этого метода применительно к сортировке немагнитного изделия по радиусу и электропроводности . Эти методы позволяют осуществлять ускоренную разбраковку магнитных изделий по одновременному измерению магнитной проницаемости и электропроводности тела . С целью повышения разрешающей способности устройств реализующих указанные методы предложено осуществлять переход от параметров тела к параметрам вещества изделия . Указано , что укорачивая длину образца либо намагничивающую обмотку электромагнитного преобразователя , можно в существенной мере расширить ассортимент контролируемых изделий по магнитным электрическим и геометрическим параметрам .

3. Разработаны и исследованы электрические схемы на основе параметрических и трансформаторных электромагнитных преобразователей с проводящими изделиями , у которых варьируются магнитные, электрические и геометрические параметры в широких пределах . Эти схемы основаны на использования стандартной аппаратуры ( вольтметры , фазометры и др. ) . Проверено качество работы данных схем , реализующих указанные методы в экспериментах на различных цилиндрических образцах , изготовленных из магнитных и немагнитных материалов . Результаты этих экспериментов хорошо согласуются с теоретическими положениями и данными контрольных методов .

4. Создана методика оценки погрешностей измерений магнитной проницаемости , удельной электрической проводимости и радиуса изделий с учетом размагничивающего фактора, возникающего из-за конечных длин преобразователя и изделия . Показано , что укорачивание длин изделия и преобразователя приводит к увеличению погрешностей измерения магнитной проницаемости и электропроводности вещества .

5. Разработаны приемы, способы и устройства для уменьшения погрешности измерения магнитной проницаемости , электропроводности и радиуса изделий путем изменения частоты зондирующего поля и фиксации ее при определенных значениях ; введения компенсации части индуктивности ( в параметрическом преобразователе ) либо части результирующей Э.д.с. ( в трансформаторном преобразователе ) , обусловленных магнитным потоком в воздушном зазоре между изделием и обмоткой преобразователя ; использование измерительной аппаратуры с высоким классом точности . Важным моментом в улучшении характеристик преобразователей является введение специальных обобщенных функ-

ций преобразования позволяющих по измеренным непосредственно значениям сигналов преобразователя определить независимо друг от друга ( в параллельном цикле ) каждый параметр в отдельности . Последнее позволяет в существенной мере ускорить процесс вычисления двух параметров . С учетом всех вышеуказанных факторов относительные погрешности измерения магнитной проницаемости и электропроводности вещества , к примеру , для ферромагнитных образцов ( сталь 45 ) с отношением длины к радиусу 20 - 25 не превышает 3 - 5 % , а электропроводности и радиуса немагнитных изделий ( при соотношении длины к радиусу больше 10 ) - 1.5 - 2 % при использовании стандартной измерительной аппаратуры . Если выбрать аппаратуру более высокого класса точности , численные значения этих погрешностей могут быть существенно снижены .

6. Показано , что для надежной сортировки ферромагнитных изделий по маркам материала необходимо, чтобы относительный разброс магнитной проницаемости и электропроводности вещества при переходе от одной марки к различным был бы в 3 - 5 раз выше, чем относительные погрешности измерения этих параметров . То же самое имеет отношение и к немагнитным цилиндрическим изделиям . Таким образом установлено , что для длинных ферромагнитных изделий ( $\lambda > 80 \dots 100$ ) разброс должен быть в пределах 4.5 - 7.5 % по магнитной проницаемости вещества и 6 - 10 % по электропроводности вещества ; для коротких магнитных образцов этот разброс должен составить 9 - 15 % по магнитной проницаемости и 15 - 25 % по электропроводности вещества . Увеличение пределов разброса для коротких образцов связано с появлением дополнительных составляющих результирующей погрешности , вызванное ошибками вычислений разномагнитизирующего фактора и допусками на геометрические размеры образца .

7. Показано , что в случае частичного перекрытия зон разброса двух параметров при переходе от одной марки к другой , необходимо применять вероятностный подход к сортировке изделий по маркам материала . На основании такого подхода построена математическая модель процесса идентификации тех или иных изделий по соответствующим им маркам . Разработана методика определения минимально допустимого объема обучающей выборки при заданных вероятностях правильной классификации , доверительной вероятности и погрешности реальной классификации . Установлен факт повышения объема обучающей выборки при снижении вероятности теоретической классификации .

8. Разработаны алгоритмы и функциональные схемы систем позволяю-

ших на основе двухпараметровых измерений управлять процессами изготовления ферромагнитных и немагнитных проволок, прутков, заготовок, изделий под крепеж и др. по допустимым значениям магнитных, электрических и геометрических параметров. Эти системы и устройства могут быть использованы для надежной сортировки цилиндрических изделий по маркам материала на металлургических, машиностроительных, электротехнических предприятиях и в других организациях.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Горкунов Б.М., Себко В.П., Бондаренко В.И., Масалджийски М.Р. Погрешности проходного вихретокового преобразователя для многопараметровых измерений - Харьков. Деп. в УкрНИИТИ, 1982, №3978 УК-Ц82. - 8 с.

2. Горкунов Б.М., Капустян А.А., Масалджийски М.Р., Себко В.П. Параметрический преобразователь для контроля ферромагнитных изделий конечной длины. - Вестник Харьковского политехнического института, 1990, № 278, с.53-55.

3. Пантелеев М.С., Масалджийски М.Р., Сиренко Н.Н., Капустян А.А. Контроль магнитных и электрических параметров трубчатых изделий. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Неразрушающие физические методы контроля" - доклад. Свердловск 1990 с.3-15 с.31,32

4. Себко В.П., Багнет О.Л., Сиренко Н.Н., Масалджийски М.Р. Исследование электромагнитного преобразователя температуры. Известия высших учебных заведений. Приборостроение № 2, 1991, том 34. Ленинград - с.46-50

5. Шапов П.Ф., Масалджийски М.Р. О вероятностном подходе к разбраковке прутковой стали методом вихревых токов. Харьк. политехн. ин-т. - Харьков, 1992. Деп. в УкрИНТЭИ 28.08.92. №1343, Ук92. - 8 с.

6. Масалджийски М.Р. Автоматизированная установка для разбраковки сталей по маркам. Харьк. политехн. ин-т - Харьков 1992. Деп. в УкрИНТЭИ 26.08.92. № 1344, Ук92. - 6 с.

7. Горкунов Б.М., Масалджийски М.Р., Себко В.П. О разбраковке ферромагнитных изделий по маркам материала. Харьк. политехн. ин-т - Харьков 1992. Деп. в УкрИНТЭИ 31.08.92. № 1366, Ук92. - 8 с.

Ответственный за выпуск к. т. н., доц Горкунов Б. М.

---

Подп. к печ. 01.06.95.	Формат 60x84 1/16.	Бумага тип.
Печать офсетная.	Усл. печ. л. 1,0	Тираж 100 экз.
Зак № 1890	Бесплатно	

---

Харьковское нежвузовское полиграфическое предприятие  
3100093, Харьков, ул. Свердлова, 115

165285

AB 27.793