

УДК 620.179

В.Ф.БУЛГАКОВ, Е.В.БУТЕНКО, А.Е.ГОЛЬДШТЕЙН, В.К.ЖУКОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Описываются вихрековые дефектоскопы для контроля водогазопроводных труб в технологическом потоке их производства, отличающиеся тем, что с целью выявления как коротких, так и протяженных дефектов труб они используют комбинированные первичные преобразователи, содержащие элементы проходных вихрековых и индукционных, а также преобразователи, представляющие комбинацию проходных и накладных. Дается описание принципа селективных вихрековых металлоискателей, основанных на использовании электромагнитных вращающихся полей.

На кафедре информационно-измерительной техники совместно с НИИ интроскопии с 1960 г. ведутся исследования, направленные на совершенствование электромагнитных методов неразрушающего контроля. В прикладном плане эти работы связаны с созданием электромагнитных дефектоскопов и металлоискателей.

Электромагнитные дефектоскопы находят широкое применение для контроля целостности различных изделий из электропроводящих материалов. В сравнении с другими дефектоскопами использование электромагнитных дефектоскопов особенно эффективно для контроля таких изделий, как проволока, прутки и трубы непосредственно в технологическом потоке их производства, благодаря высокой производительности, обеспечиваемой электромагнитными методами. В последние годы основные работы в области электромагнитной дефектоскопии были направлены на создание и совершенствование электромагнитных дефектоскопов сварных водогазопроводных труб.

Разнообразие дефектов сварных труб и тяжелые условия контроля, связанные с большими скоростями движения труб по рольгангу и радиальными смещениями труб, достигающими 3 мм, вызывают необходимость применения комбинированных вихрековых преобразователей (ВТП), обеспечивающих стабильность показаний при вибрации контролируемых изделий и выявление как коротких, так и протяженных дефектов с малыми градиентами.

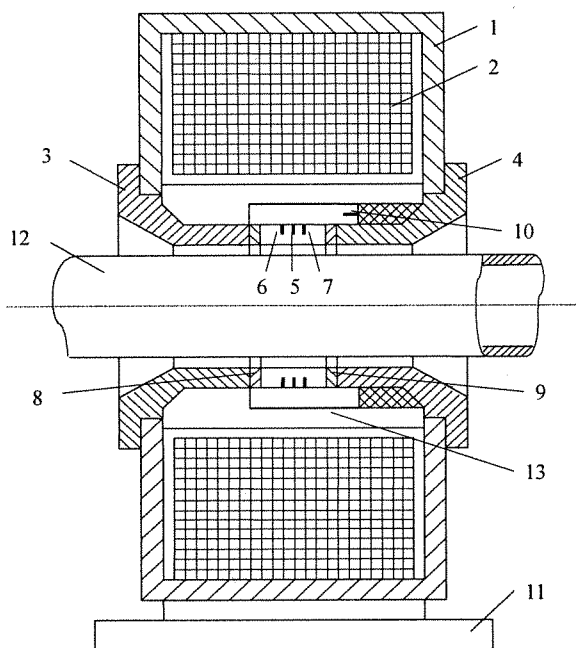


Рис. 1. Блок преобразователей

Для контроля водогазопроводных труб разработан дефектоскоп ЭД-205 с комплексным использованием проходных вихрекового и индукционного преобразователей. Для обнаружения непроваров и прожогов шва применен проходной дифференциальный ВТП, параметры которого выбраны из условия максимальной чувствительности к коротким дефектам. Для обнаружения локальных утонений стенки труб одна из обмоток ВТП используется в качестве проходного индукционного преобразователя, реагирующего на изменения постоянного магнитного потока через сечение трубы [1]. Для повышения выявляемости протяженных ужимов применена совместная обработка сигналов вихрекового и индукционного каналов, при этом вероятность обнаружения ужимов возрастает по сравнению с каждым из каналов при их автономной работе [2].

Дефектоскоп ЭД-205 состоит из электронного блока, блока намагничивающего тока и блока преобразователей со сменными модулями на каждый

типоразмер контролируемых труб с условным проходом от 15 до 50 мм.

На рис. 1 показан схематический разрез блока вихретокового и индукционного преобразователей. Блок преобразователей состоит из цилиндрического магнитопровода 1, выполненного из магнитомягкой стали, катушки 2 намагничивания постоянным током, сменных входной 3 и выходной 4 втулок, служащих полюсами магнитопровода. Вихретоковый преобразователь закреплен на выходной втулке 4 и содержит возбуждающую 5 и две измерительные обмотки 6 и 7. По бокам ВТП расположены экранирующие кольца 8 и 9. На кольцо 9 расположена обмотка ОИ₃ индукционного преобразователя (ИП). Обмотки ВТП и ИП соединены с электронным блоком через контакты 10 и разъем (не показан), расположенный на основании 11. При переходе с одного типоразмера контролируемой трубы 12 на другой заменяются входная втулка 3 и сменный модуль, состоящий из выходной втулки 4 и закрепленных на ней преобразователей ВТП и ИП, контактов 10 и экрана 13. Промежуток между экраном 13, кольцами 8 и 9 и втулкой 4 залит эпоксидным компаундом.

Структурная схема дефектоскопа ЭД-205 представлена на рис. 2. Вихретоковый канал дефектоскопа выполнен по классической схеме с проходным дифференциальным ВТП и предназначен для обнаружения непроваров шва. Напряжение генератора частотой 20 кГц поступает на возбуждающую обмотку ВТП. Разностные сигналы измерительных обмоток ОИ₁ и ОИ₂ через избирательный усилитель поступает на вход схемы амплитудно-фазовой обработки (САФОС), в которой осуществляется выделение низкочастотной огибающей сигнала и отстройка от радиальных смещений контролируемой трубы.

При контроле водогазопроводных труб печной

сварки необходимо выявлять локальные утонения стенки трубы, которые по оси трубы занимают участок длиной 30 – 70 мм. Толщина стенки трубы на этом участке по всей окружности вначале плавно уменьшается, а затем увеличивается до нормальных размеров, причем происходит увеличение внутреннего диаметра трубы. Вихретоковый канал дефектоскопа не выявляет 5 – 10 % утонения ввиду малой базы вихретокового преобразователя и достаточно высокой частоты возбуждающего поля. Для обнаружения утонений используется индукционный канал дефектоскопа, состоящий из последовательно соединенных фильтра низких частот и усилителя. В качестве индукционного преобразователя используется измерительная обмотка ОИ₂ ВТП.

На трубах печной сварки встречаются дефекты типа ужима – ужатия лишнего металла внутрь трубы, при этом на поверхности трубы образуется продольное углубление с плавными изменениями размеров. Вихретоковый канал, ввиду малой базы по измерительным обмоткам, нечувствителен к дефектам с малыми градиентами по оси трубы. Сигналы от ужимов в индукционном канале по амплитуде меньше сигналов от допустимых локальных утонений стенки трубы, поэтому по-

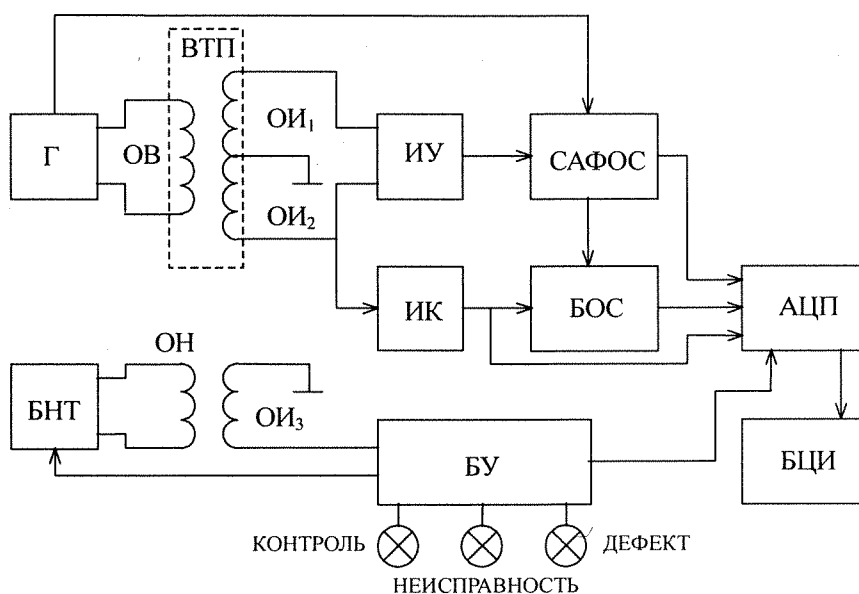


Рис. 2. Структурная схема дефектоскопа ЭД-205:

Г – генератор; ИУ – избирательный усилитель; САФОС – схема амплитудно-фазовой обработки сигнала; ИК – индукционный канал; БОС – блок обработки сигналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БНТ – блок намагничивающего тока; БУ – блок управления; БЦИ – блок цифровой индикации; ВТП – вихретоковый преобразователь; ОН – намагничивающая обмотка

вышение чувствительности индукционного канала, с целью выявления ужимов, приведет к перебраковке по локальным утонениям.

Для обнаружения ужимов применена совместная обработка сигналов в блоке БОС, состоящем из интегратора, схемы выделения модуля сигнала и умножителя. Входы интегратора и схемы выделения модуля сигнала подключены соответственно к выходам индукционного и вихретокового каналов, а выходы – ко входам умножителя. Сигналы от неглубоких ужимов соизмеримы с шумами обоих каналов. На выходе интегратора сигналы от локальных утонений имеют отрицательную полярность, а сигналы от ужимов – положительную. Умножитель перемножает сигналы только положительной полярности.

На его выход проходят сигналы от ужимов, а остальные сигналы подавляются, в том числе некоррелированные шумы, поэтому на выходе умножителя повышается отношение сигнал / шум для дефектов типа ужим.

Выходные сигналы информационных каналов поступают на аналого-цифровой преобразователь АЦП, который вырабатывает код управления цифровыми индикаторами БЦИ, пропорциональный амплитуде сигнала, и выдает сигнал на блок управления, если выходной сигнал каждого из каналов превышает заданный уровень разбраковки.

От концов трубы на выходах вихретокового и индукционного каналов возникают сигналы, исключение которых из результатов контроля осуществляется специальным устройством, расположенным в блоке управления. Это устройство по сигналам индукционного преобразователя ОИ₃ формирует импульс КОНТРОЛЬ, который запирает информационные каналы на время прохождения концами трубы зоны контроля блока преобразователей. Выделение сигналов от концов основано на амплитудной и временной селекции [3].

Намагничивающая обмотка ОН, подключенная к блоку намагничивающего тока БНТ, создает в зоне контроля постоянное магнитное поле, предназначенное для уменьшения осевых магнитных неоднородностей материала контролируемых труб. При входе контролируемой трубы в блок преобразователей увеличивается магнитный поток, изменение потока вызывает ЭДС самоиндукции в намагничивающей катушке и уменьшение тока намагничивания. В момент входа трубы в зону контроля по сигналу с блока управления на намагничивающую катушку разряжается конденсатор, компенсируя уменьшение намагничивающего тока. Величина конденсатора и напряжение, до которого он заряжен, выбираются из условия постоянства тока намагничивающей катушки [4].

Дефектоскоп ЭД-205 предназначен для контроля труб внешним диаметром от 21 до 60 мм. Порог чувствительности к дефектам в виде сквозного отверстия диаметром от 1 до 2 мм – в зависимости от типоразмера. Порог чувствительности к локальным утонениям – 15% от толщины стенки трубы. Длина неконтролируемых участков на концах трубы 30 – 50 мм. Дефектоскоп ЭД-205 надежно отбраковывает трубы со слабым швом, мелкими надрывами, пленами, локальными утонениями и утолщениями. Проведенные испытания показали возможность обнаружения частичных непроваров, которые не проявляются на гидропрессе. В НИИ интроскопии Томского политехнического университета изготовлено восемь комплектов дефектоскопа ЭД-205. Дефектоскопы с 1986 г. применяются на Челябинском трубопрокатном заводе взамен гидроиспытаний для контроля экспортной продукции.

Контроль труб малого сортамента (до 60 мм) сопряжен с рядом трудностей, обусловленных разнообразием дефектов и радиальными смещениями при движении труб по рольгангу. При скоростях контроля 2 – 4 м/с смещение оси трубы относительно оси рольганга может достигать 3 мм. В таких условиях наиболее надежную работу обеспечивают дефектоскопы с проходными вихретоковыми преобразователями. Невозможность создания равномерного возбуждающего поля для этих преобразователей, связанная с ограниченным межполюсным промежутком намагничивающего устройства, и малая база ВТП вызывают неравномерность чувствительности к точечным дефектам, которая может достигать 100 %.

Неравномерность чувствительности ВТП при контроле труб в реальных условиях с радиальными смещениями вызывает нестабильность показаний и, следовательно, низкую вероятность обнаружения точечных непроваров шва и перебраковку контролируемых труб.

Для повышения вероятности обнаружения точечных несправов шва при контроле труб с радиальными смещениями предложен вихретоковый дефектоскоп [5], в котором применен комбинированный ВТП, состоящий из обмотки возбуждения ОВ и четырех измерительных обмоток ОИ₁ – ОИ₄, выполненных в виде вытянутых прямоугольных петель, короткие стороны которых совмещены, а длинные лежат на окружностях, расположенных аксиально-симметрично относительно обмотки возбуждения (рис. 3). Каждая измерительная обмотка подключена к каналу амплитудно-фазовой обработки, коэффициент передачи каждого канала регулируется в зависимости от зазора между трубой и соответствующей измерительной обмоткой.

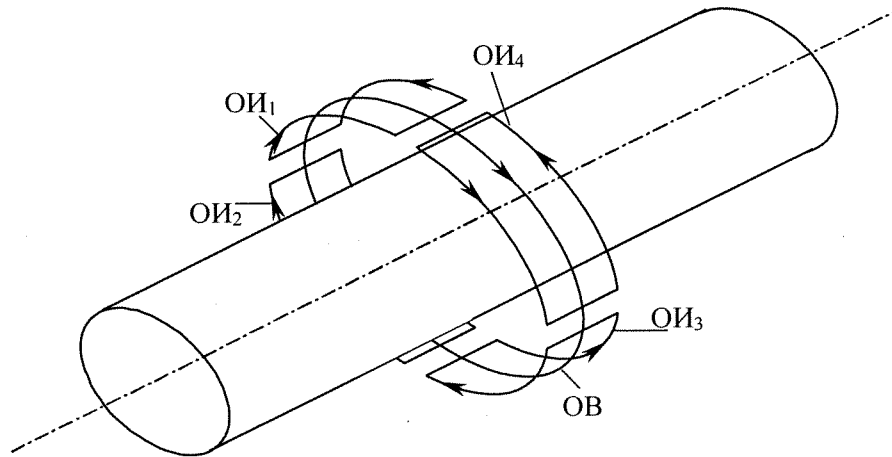


Рис. 3. Расположение обмоток комбинированного ВТП

Сигналы о радиальном смещении трубы формируются двумя измерительными мостами, образованными попарно противоположно расположенными измерительными обмотками и резисторами, которые подключены к дополнительному генератору. Эти сигналы поступают в вычислительный блок, который управляет коэффициентами передачи каналов.

Комбинированный ВТП представляет собой проходной дифференциальный преобразователь с возможностью регулировки чувствительности в зависимости от расстояния между поверхностью контролируемой трубы и соответствующим сектором преобразователя.

На основе комбинированного ВТП разработан дефектоскоп ЭД-206 для контроля труб печной сварки, структурная схема которого изображена на рис. 4.

Напряжение генератора частотой 10 кГц через усилитель мощности поступает на возбуждающую обмотку ВТП. Сигналы измерительных обмоток ОИ₁ – ОИ₄ выделяются блоком избирательных усилителей низкой частоты, резонансная частота которых $F_{рез} = 10$ кГц, и поступают на входы четырехканальной схемы амплитудно-фазовой обработки. Сигнал от точечного дефекта появляется только в той измерительной обмотке, в зоне которой он расположен. В каждом канале САФОС выделение низкочастотной огибающей осуществляется амплитудно-фазовым детектором. Фаза опорного напряжения $U_{оп}$ выбирается из условия отстройки от радиальных смещений трубы. Выходные сигналы САФОС $U_1 - U_4$ в блоке управляемых усилителей (БУУ) корректируются и суммируются.

Выходное напряжение $U_в$ блока БУУ поступает на первый вход аналого-цифрового преобразователя АЦП. Скорректированные напряжения $U_1' - U_4'$ поступают на схему самоконтроля, расположенную в блоке управления. Амплитуда сигналов от дефектов на выходе САФОС зависит от расстояния между измерительными обмотками ОИ₁ – ОИ₄ и дефектным участком контролируемой трубы. В БУУ изменением коэффициента передачи каждого канала уменьшается неравномерность чувствительности.

Напряжением $U_{вч}$ генератора частотой 50 кГц запитаны два измерительных моста, состоящие из элементов ОИ₁, ОИ₃, R_1 , R_2 , R_3 и ОИ₂, ОИ₄, R_4 , R_5 , R_6 . Сигналы о радиальных смещениях контролируемого изделия выделяются за счет включения противоположащих обмоток ОИ₁ и ОИ₃ в один

Блок управления (БУ) дефектоскопа состоит из индукционного канала и схемы выделения сигналов от концов контролируемой трубы.

Индукционный канал дефектоскопа, состоящий из последовательно соединенных фильтра низких частот, интегратора и усилителя, подключен к обмотке ОИ₅, используемой в качестве проходного индукционного преобразователя, реагирующего на изменения постоянного магнитного потока через сечение трубы, обусловленное изменением толщины стенки в этом сечении. Выходной сигнал индукционного канала поступает на вход АЦП.

Схема выделения сигналов от концов по сигналам с обмоток ОИ₆ вырабатывает импульс строб КОНТРОЛЬ (строб К), расположенный во времени между сигналами от начала и конца контролируемой трубы, возникающими в вихретоковом и индукционном каналах. С приходом импульса КОНТРОЛЬ микроконтроллер осуществляет следующие операции: управление аналого-цифровым преобразователем АЦП и запись кодов выходных напряжений U_B , U_{II} , U_X и U_Y ; запоминание максимальных значений напряжений U_B и U_{II} и сравнение их с заданным уровнем разбраковки; управление блоком цифровых индикаторов; формирование по сигналам U_X и U_Y управляющих кодов на блок усилителей БУУ и индикатор смещения трубы.

Технические характеристики дефектоскопа

Контролируемые трубы ГОСТ 3262 – 75, с условным проходом 10 – 50 мм.

Скорость движения контролируемой трубы через блок преобразователей от 2 до 4 м/с.

Допустимая амплитуда биений трубы в блоке преобразователей ± 2 мм, для труб с условным проходом 40, 50 мм $\pm 2,5$ мм.

Порог чувствительности к дефектам в виде сквозного отверстия диаметром от 1 до 2 мм в зависимости от типоразмера.

Неравномерность чувствительности к точечным дефектам при радиальных смещениях трубы ± 2 мм относительно оси преобразователя $\pm 20\%$.

Длина неконтролируемых концов труб от 40 до 60 мм в зависимости от типоразмера.

Дефектоскоп обеспечивает: индикацию амплитуды сигнала по двум каналам (НЕПРОВАР, УТОНЕНИЕ) в относительных единицах, соответствующих уровням разбраковки; индикацию радиального смещения трубы от оси блока преобразователей; управление отметчиком дефектов и электромагнитом разбраковочного устройства от сети переменного тока 220 В.

Опытным производством НИИ интроскопии Томского политехнического университета изготовлено шесть комплектов дефектоскопа ЭД-206. Дефектоскопы используются с 1990 г. на Таганрогском металлургическом заводе для контроля водогазопроводных труб с условным проходом 10 – 60 мм. Эксплуатация дефектоскопов показала, что они обеспечивают чувствительность и стабильность показаний ± 2 дБ по стандарту DIN 2440 в условиях отечественных линий контроля с радиальными смещениями 2 мм. Протяженные ужимы (с малыми градиентами) ЭД-206 выявляет на уровне 50% от их общего количества.

Для обнаружения протяженных дефектов с описанным выше преобразователем совмещен ВТП с четырьмя многосекционными накладными обмотками, чувствительный к изменению свойств по периметру сечения трубы. Совмещение преобразователей достигается использованием токов возбуждения трех синхронизированных частот и синхронно-фазовым разделением разночастотных составляющих сигналов ВТП с использованием интегрирующих элементов с импульсной обратной связью [6].

В рамках хоздоговора с АО «Челябинский трубопрокатный завод» изготовлен экспериментальный образец дефектоскопа ЭД-207 с использованием комбинированного ВТП, предназначенного для выявления коротких и протяженных дефектов. Сравнительные испытания дефектоскопов ЭД-207 и ВД-40П (МНПО «Спектр»), проведенные в июле 1995 г. в цехе № 8 АО «ЧТПЗ», показали, что у ЭД-207 вероятность обнаружения точечных дефектов выше, и он может применяться для контроля труб по стандарту DIN 2440. Протяженные дефекты (с малыми градиентами) ЭД-207 выявляет глубиной более 1 мм.

В теории и практике вихретокового контроля известен ряд методов, основанных на использовании нестационарных по направлению магнитных полей, отличающихся от традиционных ста-

ционарных полей изменяющимся в процессе контроля пространственным направлением вектора напряженности возбуждающего магнитного поля. Высокие информативные возможности этих методов обусловлены возможностью получения информации при различной взаимной ориентации вектора напряженности возбуждающего магнитного поля и объекта контроля. Благодаря этому может быть существенно повышено число информативных параметров вносимых напряжений вихретокового преобразователя и, как следствие, увеличено число контролируемых параметров или осуществлена отстройка от большего числа мешающих факторов. Информативные возможности и эффективность вышеуказанных методов были исследованы на примерах использования при решении задач определения физических параметров локальных проводящих объектов, вихретоковой дефектоскопии протяженных цилиндрических изделий, измерения перемещений.

Проблема определения физических параметров локальных проводящих объектов, скрытых в непроводящей или слабо проводящей среде, возникает в целом ряде отраслей промышленности, строительстве, георазведке, военном деле. Большое значение имеет решение таких задач, как обнаружение мин, замаскированных складов и тайников, выявление холодного и огнестрельного оружия на различных пунктах досмотра и контрольно-пропускных пунктах, в том числе предполетный досмотр авиапассажиров с целью выявления предметов, запрещенных для перевозки на воздушном транспорте. При решении данных задач существует потребность не просто определить наличие или отсутствие металлической массы в зоне контроля, а идентифицировать обнаруженный предмет, определить его параметры и сделать заключение о принадлежности к определенному классу или группе. Это требуется для исключения ложных тревог от предметов другой геометрической формы, других размеров, либо выполненных из другого материала. Кроме того, требуется обеспечить независимость чувствительности от пространственного расположения и ориентации объекта в зоне контроля. Выполнение указанных требований может быть обеспечено за счет использования нестационарных по направлению магнитных полей.

Как уже было отмечено, нестационарное по направлению магнитное поле характеризуется изменением в процессе контроля направления вектора напряженности. Изменение направления силовых линий поля проводится непрерывно, как в случае использования вращающегося магнитного поля, возбуждаемого сдвинутыми по фазе синусоидальными токами ортогональных обмоток [7 – 9], так и дискретно – за счет поочередного подключения источника возбуждающего тока к ортогональным обмоткам.

Достоинством методов вращающегося поля является высокая информативность при относительной простоте реализации контроля. Например, о форме контролируемого металлического предмета, как показано в [7 – 9], можно судить по форме фигуры, описываемой в пространстве концом вектора напряженности вторичного магнитного поля и являющейся таким образом отображением реального физического объекта.

Описанный выше метод идентификации проводящих объектов был реализован в системах селективного обнаружения огнестрельного и холодного оружия ЭМД-01 и ЭМД-02.

Однако возможность столь простой интерпретации результатов измерений существует только при контроле либо слабо проводящих объектов, либо объектов со слабо выраженными магнитными свойствами.

В случае контроля ферромагнитных предметов с сильно выраженной зависимостью эффективной магнитной проницаемости от направления намагничивания, что проявляется в значительном различии (до 90°) фаз напряженности вторичного магнитного поля для различных направлений намагничивания и характерно для предметов сильно вытянутой или сплюснутой формы, получение достоверной информации о форме предмета описанным выше способом невозможно. Это объясняется тем, что вращающееся магнитное поле является результатом сложения стационарных по направлению магнитных полей одной частоты, векторы напряженности которых различаются по направлению и фазе. По результатам измерения вторичного магнитного поля невозможно определить его составляющие, обусловленные каждой составляющей возбуждающего магнитного поля, и вследствие этого невозможно решить обратную задачу определения геометрических и электромагнитных параметров объекта контроля.

От указанного недостатка свободны методы, основанные на возбуждении дискретно изменяющегося по направлению магнитного поля. В этом случае в каждый момент времени к источнику гармонического тока оказывается подключенной только одна из ортогональных обмоток возбуждения, чем исключается вышеупомянутая неоднозначность зависимости результатов электромагнитного взаимодействия возбуждающего поля с объектом контроля.

Однако данные методы имеют специфический недостаток, заключающийся в повышенной по сравнению с методами вращающегося магнитного поля длительности процесса контроля. Это обусловлено тем, что измерение пространственных компонент вторичного магнитного поля для различных направлений намагничивания объекта контроля производится поочередно последовательно. А с учетом неизбежного наличия переходных процессов в результате каждого переключения составляющих возбуждающего магнитного поля время контроля по методу дискретно-изменяющегося поля в 2 – 5 раз превышает время контроля по методу вращающегося магнитного поля. Кроме того, дискретно-коммутационный режим возбуждения поля делает практически неэффективным использование энергетически выгодного включения обмоток в колебательный контур, что позволяет при непрерывном режиме достигнуть повышения реактивной мощности в несколько десятков раз по сравнению с мощностью, потребляемой от источника питания.

Информативные возможности метода поочередного возбуждения пространственных компонент магнитного поля с достоинствами непрерывного возбуждения с точки зрения скорости и энергетических характеристик контроля позволяют объединить метод вихрекового контроля с возбуждением разночастотных пространственных компонент магнитного поля [10 – 12].

Особенность метода заключается в возбуждении в контролируемой зоне магнитного поля с ортогональными по направлению, равными по амплитуде и различными по частоте пространственными составляющими напряженности:

$$H_x = H_0 \sin \omega_1 t; H_y = H_0 \sin \omega_2 t; H_z = H_0 \sin \omega_3 t, \quad (1)$$

для чего может быть использована система ортогональных обмоток, питаемых гармоническими токами разных частот. При этом разница частот выбирается минимально возможной для частотного разделения сигналов, так что влиянием этого различия на взаимодействие магнитного поля с металлическим объектом можно пренебречь. В большинстве практических случаев разность частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \omega_3 - \omega_2$ не превышает нескольких процентов значения средней частоты ω_2 . Результирующее магнитное поле при таком возбуждении можно классифицировать как нестационарное по направлению, поскольку результирующий вектор его напряженности изменяет свое направление в пространстве и описывает своим концом за время $2\pi/\Delta\omega$ в объеме, ограниченном поверхностью куба с ребрами, равными удвоенным амплитудам пространственных составляющих напряженности магнитного поля, сложную замкнутую кривую.

Возбуждающее магнитное поле наводит в контролируемом проводящем объекте вихревые токи, амплитуды, фазы и объемное распределение которых зависят от электропроводности и магнитной проницаемости материала, а также размеров предмета, его формы и состояния поверхностного слоя. Анализ взаимодействия нестационарного по направлению магнитного поля (1) с проводящим объектом показывает, что на основе измерения многочастотных пространственных компонент магнитного поля вихревых токов и полученных решений системы уравнений, описывающей это взаимодействие, может быть решена обратная задача определения по результатам контроля электромагнитных и геометрических параметров объекта [11].

Описанный выше метод контроля был реализован в системе идентификации проводящих объектов СИПО-01, структурная схема которой показана на рис. 5.

Нестационарное по направлению магнитное поле возбуждается в зоне контроля ВТП, имеющего три системы взаимоортогональных обмоток возбуждения. Для этого используются генераторы Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 частот ω_1 , ω_2 , ω_3 , синхронизируемые генератором Γ_4 разностной частоты $\Delta\omega$. Измерение многочастотных пространственных составляющих поля вихревых токов, индуцируемых в объекте, осуществляется с помощью трех ортогональных систем измерительных обмоток. Для разделения в реальном времени контроля близких по частоте гармонических составляющих сигнала

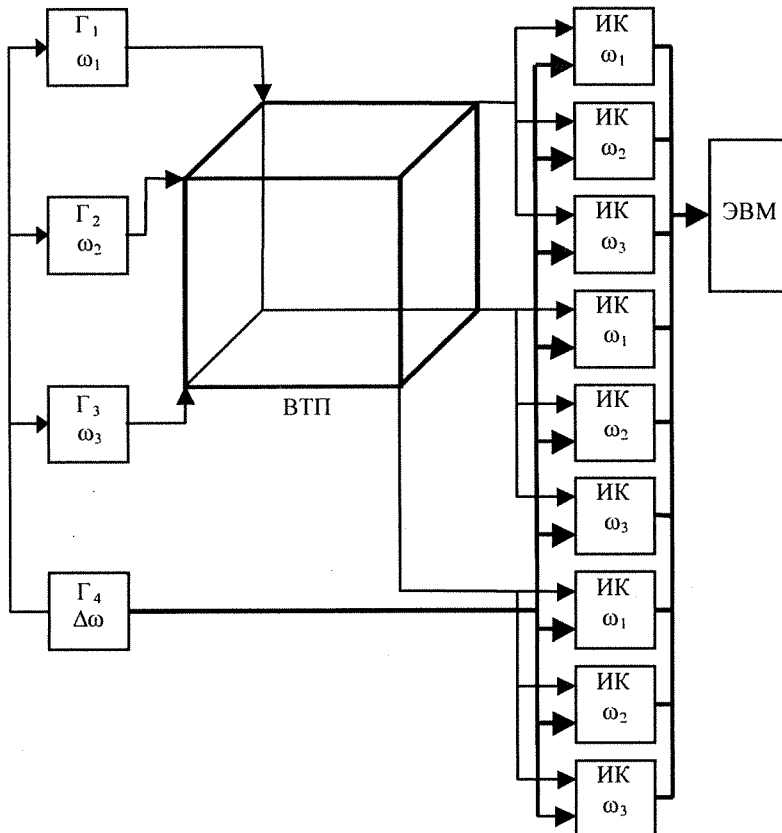


Рис. 5. Структурная схема системы идентификации проводящих объектов: Г- генераторы, ВТП-вихретоковый преобразователь, ИК- измерительные каналы, ЭВМ- электронная вычислительная машина

лов ВТП используются измерительные каналы (ИК), имеющие в своем составе избирательные цепи на основе весовых усредняющих фильтров с конечной импульсной характеристикой. Решение обратной задачи определения электрических и геометрических параметров контролируемых объектов осуществляется с использованием ЭВМ по одному из описанных в [11] алгоритмов, выбор которого определяется конкретными задачами и условиями контроля. Система контроля СИПО-01 позволяет получить информацию об электромагнитных параметрах материала, находящегося в зоне контроля проводящего объекта, его форме, размерах, ориентации и местоположении в пространстве.

Большие возможности и перспективы имеет использование нестационарных по направлению магнитных полей в вихретоковой дефектоскопии. В настоящее время для дефектоскопии протяженных металлических изделий используются главным образом дефектоскопы с проходными дифференциаль-

ными и накладными вращающимися вихретоковыми преобразователями, а также с вращающимся магнитным полем. Первые наиболее эффективны для выявления коротких дефектов, но не обеспечивают надежного обнаружения протяженных дефектов с малым градиентом изменения свойств в продольном направлении. Вторые не могут обеспечить приемлемого для цеховых условий зазора между преобразователем и контролируемым изделием. Этот же недостаток характерен и для дефектоскопов с вращающимся магнитным полем. Причиной этого является следующее. Вращающееся поле ВТП создается двумя токами обмоток возбуждения одной частоты, сдвинутыми по фазе на 90 градусов. При радиальном смещении или перекосе контролируемого изделия относительно продольной оси вихретокового преобразователя в общем случае, когда направление смещения не совпадает с осями симметрии преобразователя, лежащими в ортогональной его продольной оси плоскости, вносимые напряжения измерительных обмоток обусловлены и той и другой квадратурными составляющими возбуждающего магнитного поля. Поэтому, в отличие от классического ВТП со стационарным по направлению магнитным полем, годографы сигналов ВТП с вращающимся магнитным полем от смещения изделия представляют собой не близкие к прямым линии (линии смещения), а кривые в виде эллипсов. По этой причине невозможна качественная отстройка от влияния радиальных смещений и перекосов контролируемого изделия относительно продольной оси ВТП, что делает практически невозможным использование дефектоскопа с вращающимся полем для контроля на больших скоростях некалиброванных прутков и труб, когда радиальные смещения достигают 10 – 15% от диаметра. Данный недостаток устраняется использованием ВТП с разночастотными пространственными компонентами магнитного поля [15]. Это обеспечивает возможность разделения реакций ВТП на взаимодействие с контролируемым объектом каждой из частотных состав-

ляющих возбуждающего магнитного поля и осуществления эффективной амплитудно-фазовой отстройки от радиальных смещений и перекосов. Данный метод был реализован в трех модификациях дефектоскопа: ВДП-401, ВДСП-402 и ВДП-403.

На рис. 6 приведена структурная схема вихретокового дефектоскопа прутков ВДП-403, отличающегося от предыдущих модификаций улучшенной отстройкой от влияния на результаты контроля изменений электромагнитных свойств контролируемых изделий. ВТП дефектоскопа представляет собой систему многосекционных накладных обмоток (на рисунке показано поперечное сечение преобразователя). Возбуждающее магнитное поле с разночастотными пространственными составляющими создается двумя двухсекционными ортогональными обмотками возбуждения $ОВ_1$ и $ОВ_2$, питаемыми от генераторов Γ_1 и Γ_2 частот ω_1 и ω_2 , синхронизируемых сигналом генератора Γ_3 разностной частоты $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$:

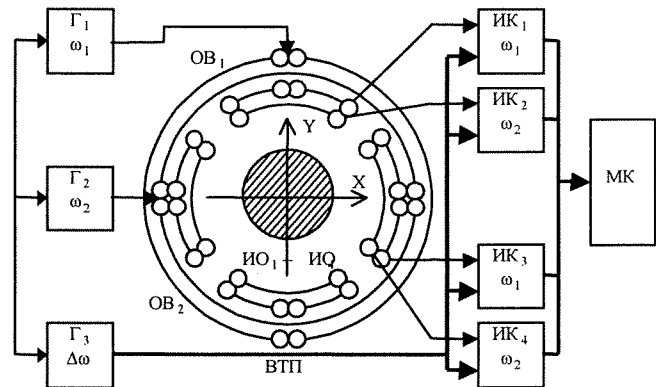


Рис. 6. Структурная схема дефектоскопа: $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ – генераторы; $ОВ$ – обмотка возбуждения; $ИО$ – измерительная обмотка; ВТП – вихретоковый преобразователь; ИК – измерительный канал; МК – микроконтроллер

$$U_i = U_m \sin \omega_1 t; U_i = U_m \sin \omega_1 t. \quad (2)$$

Величина $\Delta\omega$ пренебрежимо мала по сравнению с частотами токов возбуждения. Для обеспечения независимости результатов контроля от азимута дефекта ВТП содержит четыре многосекционные измерительные обмотки $ИО_1 - ИО_4$. Измерительными каналами $ИК_1 - ИК_4$, имеющими в своем составе амплитудно-фазовые детекторы и интегрирующие дискретизаторы, осуществляется качественное разделение сигналов разной частоты и отстройка от влияния смещений и перекосов контролируемого изделия относительно продольной оси преобразователя. Вычислительным блоком, выполненным на основе микропроцессора, выполняется вычислительная обработка сигналов ВТП, обеспечивающая независимость результатов контроля от азимута дефекта, смещений и перекосов контролируемого изделия, изменения его электромагнитных параметров.

Дефектоскоп ВДП-403 предназначен для автоматизированного контроля на наличие дефектов поверхностного слоя горячекатаных и холоднотянутых прутков и труб с внешним диаметром от 12 до 55 мм и имеет следующие основные технические характеристики:

- минимальные обнаруживаемые дефекты в виде продольной прорези длиной 40 мм, шириной 0,1 мм и глубиной 2,5% от внешнего диаметра;
- максимальное поперечное смещение контролируемого изделия от продольной оси преобразователя от 1 до 2 мм в зависимости от типоразмера;
- максимальная неравномерность чувствительности к дефектам во всем диапазоне смещений изделия – 75%;
- длина неконтролируемых концов изделия от 40 до 60 мм в зависимости от типоразмера;
- скорость контроля до 2 м/с;
- остаточная магнитная индукция в изделии после осуществления контроля – 0,03 Тл.

Высокие эксплуатационные и метрологические характеристики измерительной аппаратуры могут быть обеспечены использованием нестационарных магнитных полей для определения пространственных координат и измерения перемещений, проводящих электрический ток объектов. В частности, большое практическое приложение имеет разработка методов и преобразователей для измерения относительно больших перемещений (значительно превышающих размеры проводящего объекта). Такая задача возникает в случае необходимости определения пространственных координат локальных проводящих объектов в некоторой области пространства, при измерении уровня сыпучих и жидких веществ, когда их свойства позволяют применять в качестве чувствительного

элемента поплавков с закрепленным на нем короткозамкнутым витком и т.п. Наибольшее распространение при решении подобных задач получили многоэлементные трансформаторные преобразователи с функциональным пространственным распределением чувствительности, когда обеспечивается зависимость амплитуды вносимой ЭДС измерительной обмотки или соотношения амплитуд вносимых ЭДС двух измерительных обмоток с периодическим пространственным распределением чувствительности к проводящему объекту. Во втором случае обеспечиваются более высокая точность и больший диапазон измерений, однако и эти параметры могут быть недостаточны для удовлетворения возрастающих требований практики. Например, при измерении уровня жидкостей в резервуарах требуется обеспечить погрешность, не превышающую нескольких миллиметров при изменении уровня в диапазоне нескольких десятков метров и весьма суровых эксплуатационных условиях. В этом случае наиболее эффективно применение ВТП с бегущим магнитным полем, характеризующимся прямо пропорциональной зависимостью фазы напряженности магнитного поля от линейной координаты [16 – 18].

Высокие метрологические и эксплуатационные возможности метода измерения перемещений проводящих объектов на основе использования вихрекового преобразователя с бегущим магнитным полем были показаны на примере решения задачи измерения уровней нефтепродуктов и подтоварной воды в резервуарах.

На рис. 7 показана структурная схема уровнемера УПЭ-10, реализующего описанный выше метод. ВТП уровнемера представляет собой многополюсный синусно-косинусный трансформаторный преобразователь с бегущим магнитным полем.

Обмотки возбуждения ВТП $ОВ_1$ и $ОВ_2$ запитываются от генератора Γ квадратурных напряжений переменными токами I_1 и I_2 , сдвинутыми по фазе на 90° :

$$I_1 = I_m \sin \omega t; I_2 = I_m \cos \omega t. \quad (3)$$

Витки обмоток возбуждения $ОВ_1$ и $ОВ_2$ распределены вдоль оси преобразователя (направления измеряемого перемещения) соответственно по синусоидальному и косинусоидальному законам. В сочетании с квадратурным фазовым сдвигом токов возбуждения это обеспечивает создание вдоль оси преобразователя бегущего магнитного поля, характеризующегося линейной зависимостью фазы напряженности возбуждающего магнитного поля φ от осевой линейной координаты x :

$$\varphi = x \pi / a. \quad (4)$$

Здесь a – межполюсное расстояние.

На каждом межполюсном интервале трансформаторного ВТП имеется измерительная обмотка $ИО_1$ – $ИО_4$. Обмотки ВТП охвачены короткозамкнутым витком КЗВ, укрепленным на перемещающемся с измеряемым уровнем поплавке. ЭДС наводятся в тех $ИО$, вблизи которых находится КЗВ. При этом фазы вносимых напряжений связаны с измеряемым перемещением той же формулой (4), что и фаза напряженности возбуждающего магнитного поля. Измерительным каналом ИК осуществляется аналоговая обработка сигналов ВТП и цифровое измерение фазы вносимых напряжений. Вычислительным блоком, выполненным на основе микроконтроллера МК, осуществляется

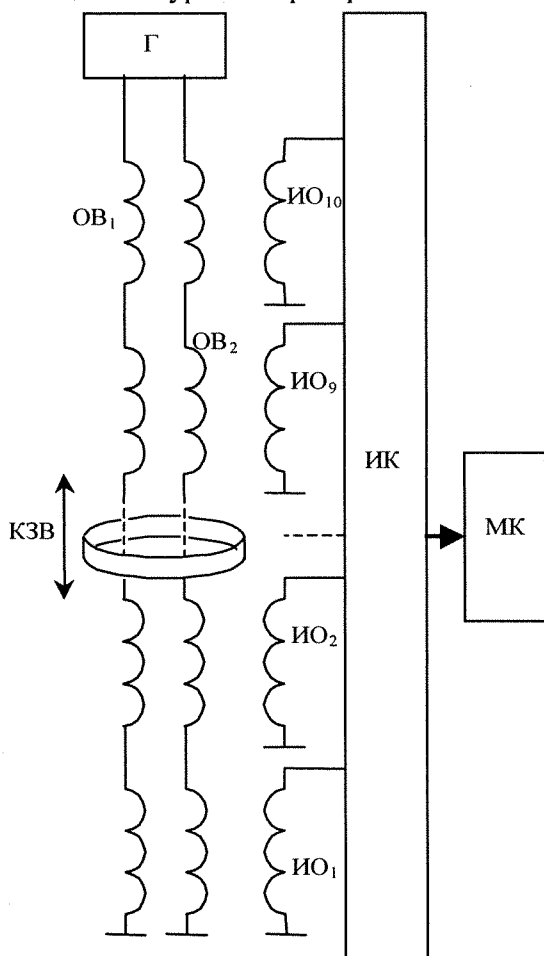


Рис. 7. Структурная схема уровнемера: Γ – генератор; $ОВ$ – обмотка возбуждения; КЗВ – короткозамкнутый виток; $ИО$ – измерительная обмотка; ИК – измерительный канал; МК – микроконтроллер

расчет уровня жидкости в резервуаре на основе совместной обработки информации о превышении порогового уровня вносимыми ЭДС измерительных обмоток и информации о их фазе. Уровнемер УПЭ-1.0 имеет следующие основные характеристики:

- пределы измерения уровня нефти (1,5 – 10) м;
- пределы измерения уровня подтоварной воды (0,5 – 4) м;
- минимальная разность уровней нефти и воды 1,5 м;
- максимальная погрешность измерения уровня нефти 2,5 мм;
- максимальная погрешность измерения уровня подтоварной воды 50 мм;
- высота резервуара $11,5 \pm 0,5$ м.

Уровнемер имеет цифровую индикацию значений уровней нефти и подтоварной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. №721739 / В.К. Жуков, В.Ф. Булгаков. - Оpubл. в БИ. - 1980. - №10.
2. А.с. №1045112 / Булгаков В.Ф. - Оpubл. в БИ. - 1983. - №36.
3. А.с. №789732 / В.К. Жуков, В.Ф. Булгаков. - Оpubл. в БИ. - 1980. - №47.
4. А.с. №978030 / В.Ф. Булгаков, В.К. Жуков. - Оpubл. в БИ. - 1982. - №44.
5. А.с. №1397821 / В.Ф. Булгаков. - Оpubл. в БИ. - 1988. - №19.
6. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е. // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. - Рига: Рижский политехн. ин-т, 1979. - С.44-48.
7. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е. // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. - Рига: Рижский политехн. ин-т, 1980. - С.36-42.
8. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е., Сафончик Е.И. // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. - Рига: Рижский политехн. ин-т, 1982. - С.25-33.
9. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е. // Дефектоскопия. - 1989. - № 2. - С.31-35.
10. Гольдштейн А.Е., Жуков В.К., Калганов С.А., Коновалов В.Е. // Дефектоскопия. - 1990. - № 2. - С.72-77.
11. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. // Труды Всес. конф. по разработке приборов и методов обнаружения единичных металлических предметов. - Кутаиси, 1991.
12. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. // Труды Всес. конф. по разработке приборов и методов обнаружения единичных металлических предметов. - Кутаиси, 1991.
13. А.с. № 1651260 / А.Е. Гольдштейн, В.К. Жуков, С.А. Калганов, В.Е. Коновалов. - Оpubл. в БИ. - 1991. - №19.
14. Патент РФ № 2090882 / В.Ф. Булгаков, А.Е. Гольдштейн, С.А. Калганов. - Оpubл. в БИ. - 1997. - №26.
15. А.с. № 2077805 / А.Е. Гольдштейн, В.Я. Грошев, В.А. Забродский, С.А. Калганов. - Оpubл. в БИ. - 1997. - № 11.
16. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. // Дефектоскопия. - 1997. - № 5. - С.59 - 64.
17. Гольдштейн А.Е. // Дефектоскопия. - 1997. - № 5. - С.65-68.
18. Гольдштейн А.Е., Жуков В.К., Калганов С.А. // Неразрушающий контроль и диагностика. - Томск, 1998. - С.19-22.