



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОНАСОСА

В. Ф. ГАМАЛИЙ, С. В. СЕРЕБРЕННИКОВ, Д. В. ТРУШАКОВ

На основе комплексных исследований взаимодействия вихретоковых преобразователей (ВТП) с образцами, содержащими дефекты типа «непровар» и «трещина», получены упрощенные выражения, описывающие влияние на параметры ВТП размеров дефекта и основного мешающего фактора — зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. Разработаны вихретоковый дефектоскоп с резонансной отстройкой от влияния зазора и автоматизированная система для экспресс-контроля деталей гидронасоса.

On basis of the complex research of interaction between eddy-current transformers (ECT) and specimens with «fusion» type and «crack» type defects received the simplified equations for calculation influence defects dimensions and the main disturbing factor (variable air-gap fluctuation between ECT and tested surface) on operation factors ECT. Developed a eddy-current defectoscope with resonance suppression air-gap influence and automation system for express testing parts of hydraulic pumps in process manufacture.

Введение. Современный этап развития технологий вихретокового контроля характерен переходом от диагностики по альтернативному принципу «наличие дефекта — отсутствие дефекта» к количественному контролю с определением степени критичности выявленных дефектов и их параметров [1]. Это имеет большое значение при эксплуатации наиболее ответственных и дорогостоящих деталей и узлов, контроль качества которых позволяет объективно прогнозировать ресурс конструкций с позиций механики разрушений и сократить убытки от рекламаций.

К особенностям современной дефектоскопии следует отнести то, что, несмотря на широкую номенклатуру серийно выпускаемых приборов неразрушающего контроля (НК) [2], специфика для каждого отдельного случая (особенности структуры и свойств материала, формы контролируемого изделия, пожелания заказчика и т. п.) обуславливает необходимость дополнительных исследований и разработку специализированного прибора. Кроме того, в ряде случаев такой путь является экономически более приемлемым для заказчика.

ВАТ «Гидросила» (г. Кировоград) является крупнейшим поставщиком на экспорт и внутренний рынок реверсивных насосов объемного гидропривода ГСТ-90, который входит в состав аксиально-поршневых машин. В связи с этим возникла необходимость в процессе изготовления проводить сплошной контроль на наличие дефектов (трещин и непроваров) наиболее нагруженных и ответственных деталей гидронасоса: плунжера, распределителя и сепаратора. Отмеченные детали имеют форму тел вращения, характеризуются сложной конфигурацией с многочисленными канавками и отверстиями. Вследствие особенностей технологии изготовления в плунжере наиболее распространены являются дефекты сварного шва типа «непровар», в распределителе и сепараторе — нарушение целостности металла типа «трещина». Плунжер изготавливается из двух цилиндрических за-

готовок путем их сваривания трением. Качество полученного шва ухудшается при колебаниях скорости вращения свариваемых частей, неплотности контакта, осевых вибрациях и т. п. Для дефектоскопии плунжеров заводом-изготовителем было поставлено требование: *разработать прибор упрощенной конструкции; с заменой ручного сканирования поверхности плунжера выполнением 2-3 манипуляций, во время которых можно определить качество сварочного шва.*

На основании сравнительного анализа физических методов НК [3], нами избран вихретоковый метод как наиболее оптимальный для построения автоматизированной системы контроля ответственных деталей гидронасоса.

Выбор первичного вихретокового преобразователя для дефектоскопического контроля ответственных деталей гидронасоса. Целью исследований является обоснование конструкции первичного ВТП, который бы имел наибольшую чувствительность к анизотропии электрических и магнитных свойств контролируемого образца, вызванной дефектами сварного шва. Поэтому для контроля плунжеров исследовали ВТП с П-образным ферритовым сердечником. При контроле распределителей и сепараторов на наличие трещин необходимо автоматизировать сканирование всей рабочей поверхности деталей. При этом желательно, чтобы ВТП имел малые геометрические размеры для обеспечения необходимой локальности контроля. При этом следует учитывать, что не существует универсального ВТП со всем спектром свойств.

Предшествующие исследования [4] показали, что для решения поставленных задач наиболее пригодны два типа ВТП:

накладной с П-образным сердечником, который традиционно используют для контроля анизотропных изделий;

накладной со стержневым сердечником, который используют для регистрации локальных дефектов.

Методика проведения исследований включала:

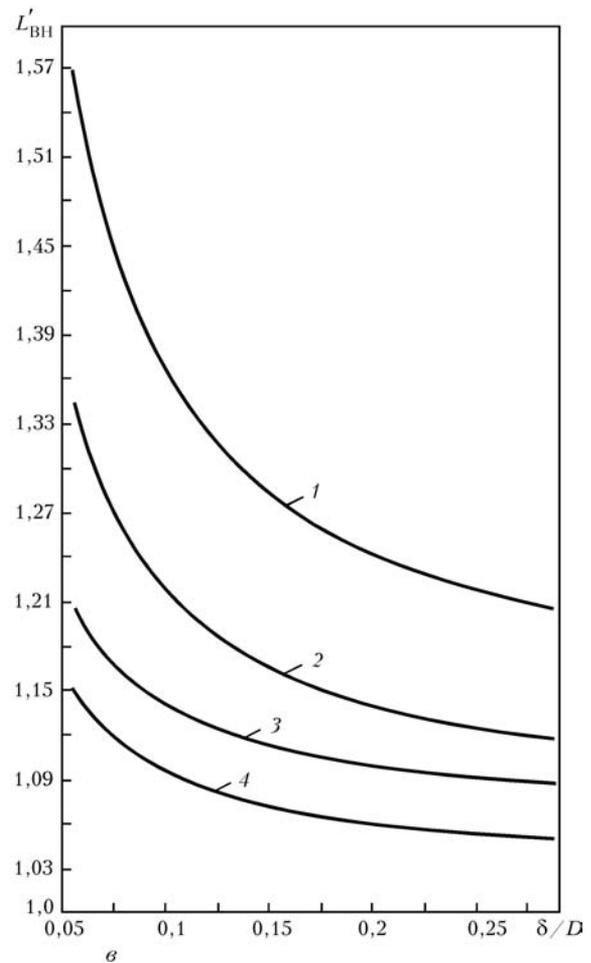
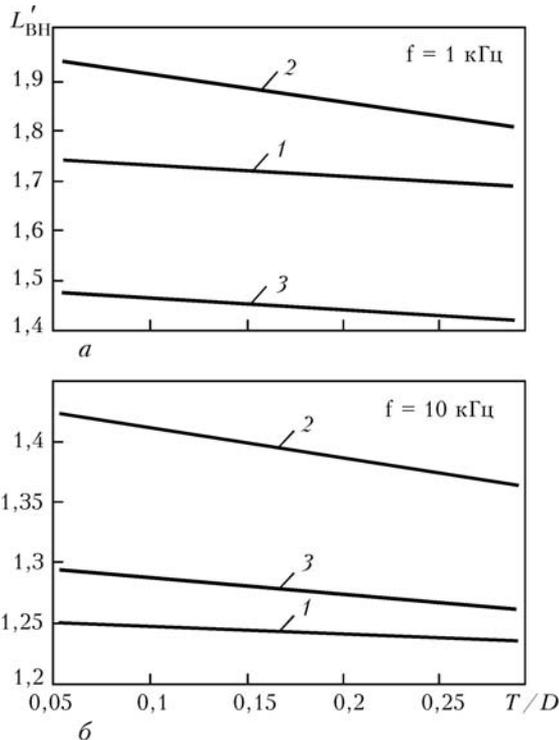


Рис. 1. Зависимости относительных вносимых индуктивностей $L'_{вн}$: а – $L'_{вн} = f(T/D)$ со стержневым сердечником (кривая 3) и с сердечником П-образной формы, в случае, если один из полюсов находится над трещиной (кривая 1) и если оба полюса расположены над трещиной (кривая 2) на образцах из ферромагнитной стали на частотах: $f = 1$ кГц и б – $f = 10$ кГц соответственно; в – $L'_{вн} = f(\delta/D)$ для П-образного ВТП на частоте 1 кГц (кривая 1); для стержневого ВТП на частоте 1 кГц (кривая 2); для П-образного ВТП на частоте 10 кГц (кривая 3); для стержневого ВТП на частоте 10 кГц (кривая 4)

изготовление образцов накладных ВТП стержневого типа и с П-образным магнитопроводом; имитирование удлиненных непроваров и трещин с шириной раскрытия T , нормированной к диаметру D полюса магнитопровода ВТП на образцах ферромагнитной стали ШХ15СГ, которая используется для изготовления наиболее ответственных деталей гидронасоса;

имитирование зазора δ между накладным ВТП и контролируемой поверхностью, нормированного к диаметру D магнитопровода ВТП;

определение зависимостей вносимых индуктивностей $L'_{вн}$ от соотношений T/D и δ/D ;

обоснование конструкции ВТП.

Выбор ВТП с П-образным сердечником при сравнении ВТП со стержневым сердечником для обнаружения несплошностей типа «непровар» в плунжере обосновывается результатами сравнительных исследований на цифровом измерителе L, C, R E7-8 при питании ВТП синусоидальным током частотой 1 кГц и на цифровом измерителе E7-14 при питании ВТП током частотой 1 и 10 кГц. Результаты экспериментальных исследований представлены с усреднением по 10 измерениям.

ВТП с П-образным и с стержневым сердечниками были изготовлены таким образом, чтобы они имели одинаковую индуктивность вне контролируемой поверхности (в воздухе) $L_0 = 1,19$ мГн. Трещины имели прямоугольную форму с раскры-

тием, которое изменялось в пределах $T/D = 0,014...0,3$. Кроме того, зазор δ между накладным ВТП и контролируемой поверхностью также изменяли в пределах $\delta/D = 0,014...0,3$.

Результаты измерений нормированных вносимых индуктивностей $L'_{вн}$ ($L'_{вн} = L_{вн}/L_0$, где $L_0 = 1,19$ мГн – собственная индуктивность) в функции T/D и δ/D на образцах, выполненных из ферромагнитной стали при питании ВТП током частотой $f = 1...10$ кГц приведены на рис. 1. Данные зависимости аппроксимированы методом наименьших квадратов (МНК) – зависимость $L'_{вн} = f(T/D)$ лучше всего описывается линейными функциями:

$$L'_{вн} = a_1 \frac{T}{D} + b_1, \tag{1}$$

наилучшей кривой, которая описывает зависимость $L'_{вн} = f(\delta/D)$, является гипербола:

$$L'_{вн} = \frac{a_2}{\delta/D} + b_2, \tag{2}$$

где a, b – коэффициенты, определенные методом МНК (указаны в табл. 1, 2).

Как видно из рис. 1, а, б, чувствительность (наклон кривой) П-образного ВТП в случае, когда оба его полюса расположены над трещиной, вдвое



Таблица 1. Значения коэффициентов a , b и коэффициента парной корреляции K

ВТП над трещиной с шириной розкрыва T	Линейная функция (1)					
	$f = 1$ кГц			$f = 10$ кГц		
	a_1	b_1	K	a_1	b_1	K
Стержневой	-0,227	1,487	0,989	-0,142	1,301	-0,982
П-образный (один полюс находится над трещиной)	-0,223	1,756	0,997	-0,061	1,253	0,999
П-образный (два полюса находятся над трещиной)	-0,573	1,974	0,996	-0,251	1,437	0,97

Таблица 2. Значения коэффициентов a , b и коэффициента парной корреляции K

ВТП над контролируемой поверхностью с определенным зазором δ	Гиперболическая зависимость (2)					
	$f = 1$ кГц			$f = 10$ кГц		
	a_1	b_1	K	a_1	b_1	K
Стержневой	0,015	1,063	0,956	0,0069	1,026	0,963
П-образный	0,025	1,120	0,967	0,0080	0,060	0,986

превышает чувствительность стержневого ВТП. Даже при попадании трещины лишь под один из рабочих полюсов П-образного ВТП его чувствительность не хуже, чем у стержневого. Меньшая чувствительность стержневого ВТП поясняется тем, что у него, в отличие от П-образного, лишь один из торцов является рабочим. Т. е., чувствительность П-образного ВТП достаточная для надежной регистрации трещин даже одним из полюсов. И так, более надежное выявление дефекта обеспечивается при его расположении одновременно под обоими полюсами ВТП. Таким образом, для наблюдения несплошностей типа «непровар» в плунжере выбираем накладной ВСП с П-образным сердечником, который имеет наибольшую чувствительность. При этом ВТП с П-образным сердечником встроен в измерительную головку таким образом, чтобы при перемещении относительно контролируемого образца оба полюса были ориентированы вдоль сварного шва.

Анализируя функциональные зависимости, которые представлены на рис. 1, σ , можно сделать вывод, что как для П-образного, так и для стержневого ВТП на частоте 10 кГц чувствительность к влиянию зазора δ меньше, чем на частоте 1 кГц.

Полученные экспериментальные зависимости с вероятностью 95 % соответствуют разработанной нами математической модели [5], которая описывает взаимодействия ВТП, размещенного над ферромагнитным образцом с трещиной.

Разработка автоматизированной системы вихретокового контроля нарушений сплошности ответственных деталей гидронасоса. В основу данной автоматизированной системы положен вихретоковый дефектоскоп. При динамическом вихретоковом контроле распределителя и сепаратора среди факторов, которые могут наиболее существенно влиять на ошибку измерения, является влияние колебаний зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. Недостатком известных способов уменьшения влияния колебаний зазора [6] является ухудшение разрешающей способности, т. е. воз-

можности выявлять дефекты при значительных колебаниях зазора.

Приведенные выше результаты исследований $L'_{\text{вн}} = f(T/D, \delta/D)$ легли в основу разработки нового резонансного способа отстройки от влияния зазора [7], реализованного при построении вихретокового дефектоскопа для контроля ферромагнитных изделий — основного измерительного блока автоматизированной системы дефектоскопического контроля.

Структурная схема вихретокового дефектоскопа приведена на рис. 2. Устройство состоит из двух каналов обработки — амплитудного и фазового, поисковой системы и узла индикации.

В поисковую систему дефектоскопа входят генератор синусоидальных колебаний с устройством управления частотой и два LC-контура: измерительный и эталонный. Сигналы с амплитудного и фазового каналов подаются на входы схемы совпадения, к выходу которой подсоединен узел индикации. ВТП входит в состав измерительного LC контура.

В процессе работы дефектоскопа при выявлении трещины вектор напряжения с датчика увеличивается по абсолютной величине и сдвигается по фазе в сторону увеличения частоты. В случае, если датчик установлен на острых кромках (краях) изделия, то амплитуда сигнала с датчика тоже увеличивается, но фаза сигнала при этом сдвигается в сторону уменьшения частоты. Таким образом, двухканальный принцип построения (фазовый и амплитудный каналы) позволяет отстроиться от такого мешающего фактора, как влияние края поверхности нахождение дефектов типа «трещина». Изменение зазора между ВТП и исследуемой поверхностью приводит к изменению амплитуды сигнала с его выхода. Однако на определенной частоте изменение напряжения с ВТП по амплитуде при его установлении на контролируемую поверхность приблизительно равняется нулю. Таким образом, управляя частотой генератора, можно добиться независимости амплитуды сигнала с ВТП от колебания величины зазора. Установление частоты генератора, на которой выполняется условие неизменности амплитуды сигнала при изменении зазора, можно выполнить автоматически. С этой целью в схеме использован эталонный LC-контур, выполненный по аналогии с измерительным. Эталонный LC-контур расположен вне контролируемой поверхности (в корпусе устройства) и предназначен для изменения частоты генератора [8]. Для этого используется метод сравнения сигналов

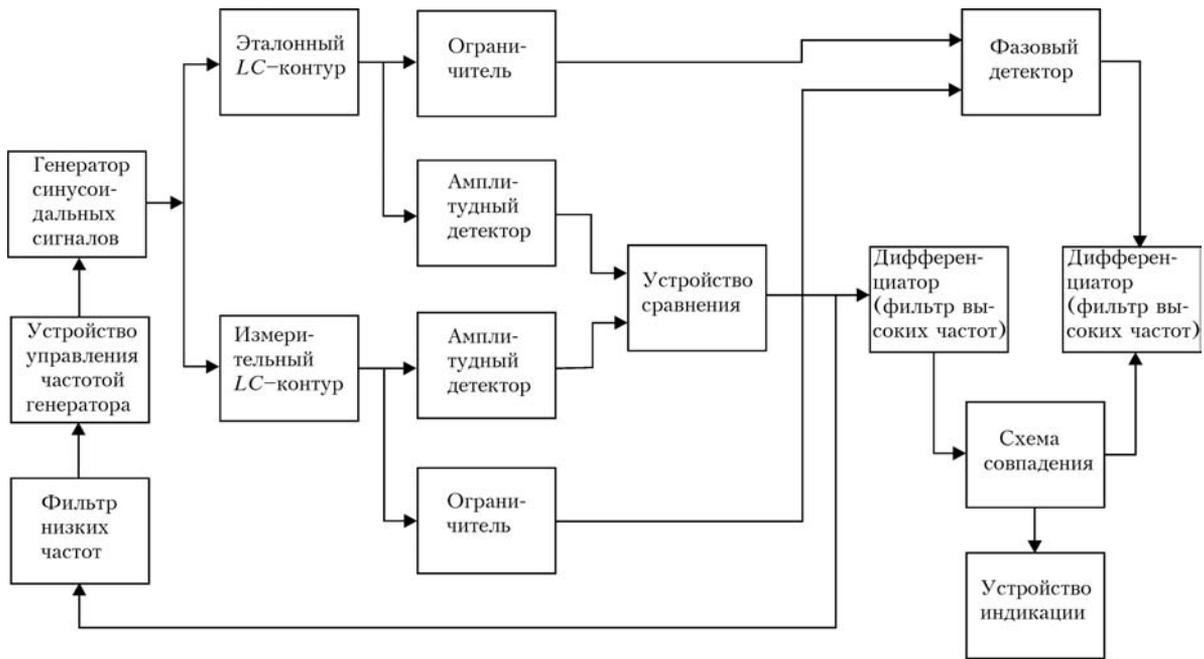


Рис. 2. Структурная схема вихревого дефектоскопа

с эталонного и измерительного контуров. С этой целью в схеме используется схема сравнения, выходной сигнал которой действует в качестве обратной связи через фильтр низких частот на прибор управления частотой генератора. В случае, если при установлении датчика на контролируемую поверхность обнаруживается несоответствие амплитуд сигналов измерительного и эталонного контуров, схема сравнения вырабатывает сигнал несоответствия, который через фильтр низких частот воздействует на устройство управления частотой генератора. Вследствие этого частота изменяется в сторону уменьшения найденного несоответствия. Таким образом, обратная связь позволяет поддерживать независимость амплитуды сигнала с выхода датчика от величины колебаний зазора. Изменение параметров исследуемой поверхности также автоматически отслеживается (изменение электропроводности и магнитной проницаемости материала). Мешающие факторы (зазор, изменение электропроводности и магнитной проницаемости) изменяются сравнительно медленно при движении датчика по контролируемой поверхности. Поэтому сигнал обратной связи находится в полосе пропускания фильтра низких частот и таким образом воздействует на устройство управления частотой генера-

тора. В случае, если найден дефект, сигнал с выхода датчика имеет характер короткого импульса, не пропускается фильтром и не действует на устройство управления частотой. Такой сигнал через дифференциатор (фильтр высоких частот), пороговое устройство и схему совпадения подается на устройство индикации. Фазовый канал используется для исключения ложных срабатываний в случае установления датчика на кромку или острый край детали. При этом амплитуда сигнала с датчика возрастает подобно сигналу, если датчик обнаружил дефект, однако изменение фазы противоположно по знаку. При совпадении быстрого увеличения амплитуды и фазы схема совпадения вырабатывает сигнал для устройства индикации.

Для автоматизации процесса контроля ответственных деталей гидронасоса-сепаратора и распределителя нами разработано сканирующее устройство с микропроцессорным управлением, структурная схема которого приведена на рис. 3. Деталь устанавливается на диэлектрический диск 8, который приводится во вращение с помощью первого шагового двигателя с редуктором 7. ВТП 9 перемещается поступательно по радиусу от периферии к центру детали при помощи второго шагового двигателя с редуктором 1, с шагом, равным диаметру сердечника ВТП [9]. Скорость перемещения ВТП синхронизирована с вращением детали. Счетчик оборотов содержит оптопару 6. Измерительный резонансный тракт дефектоскопа содержит ВТП 1, генератор 2, амплитудный детектор 3, усилитель 4.

Сигнал от ВТП имеет сложный характер в соответствии с заданной конфигурацией детали. На этом фоне дефекты обнаруживаются путем обработки сигнала в однокристальном микроконтроллере 10 (AT89C51). Статистически усредненная информация, которая получена в результате сканирования ряда бездефектных деталей (эталон) с допустимыми технологическими отклонениями,

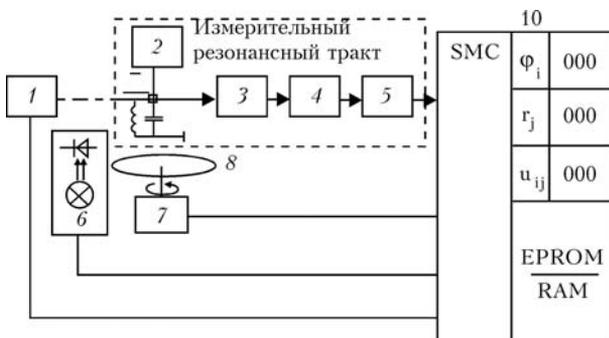


Рис. 3. Структурная схема сканирующего устройства

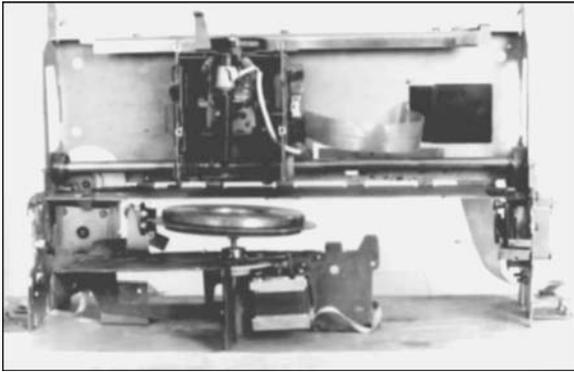


Рис. 4. Сканирующее устройство для вихретокового контроля ответственных деталей гидронасоса

записывается в постоянное запоминающее устройство — ПЗУ (EPROM) [10].

В процессе сканирования текущей детали в микроконтроллере постоянно сравниваются значения сигналов ВТП по траектории с аналогичными значениями сигналов, записанными в ПЗУ. При этом краевые эффекты, влияние кромок деталей и других особенностей рельефа устраняются автоматически. ПЗУ содержит записи эталонных сигналов для нескольких типов деталей. Перед началом контроля оператор задает режим работы дефектоскопа, который соответствует конфигурации конкретной контролируемой детали.

При прохождении датчиком дефектного участка появляется отклонение сигнала ΔU_{ij} от допустимого значения и в оперативном запоминающем устрой-

стве (ОЗУ) (RAM) фиксируются угловая $\varphi_i = \omega t_i$ и радиальная $r_j = N_i D$ координаты (t_i — продолжительность сканирования; N_i — число шагов ВТП; D — диаметр сердечника ВТП). Значение ΔU_{ij} определенной мерой характеризует размер дефекта. По результатам дефектограммы делается вывод о пригодности детали к эксплуатации или, в случае получения негативной информации, дополнительно проводятся механические испытания под нагрузкой.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 5 имеет период дискретизации, который соответствует перемещению ВТП на расстояние:

$$\Delta l_i = \frac{\pi r_j \Delta \varphi_i}{180^\circ}$$

Достаточная для достижения поставленной цели точность реализуется при $\Delta l_i = D$.

Для сокращения времени контроля в дефектоскопе предусмотрен пороговый режим, предназначенный для фиксации наличия так называемых опасных (критических) дефектов. Критическим считается дефект с размерами, при которых деталь непременно разрушается во время гарантийного срока эксплуатации. В этом режиме процесс сканирования поверхности детали длится до тех пор, пока не будет зафиксирован первый такой дефект. При этом дальнейший контроль прекращается, сканирующее устройство возвращается в исходное по-

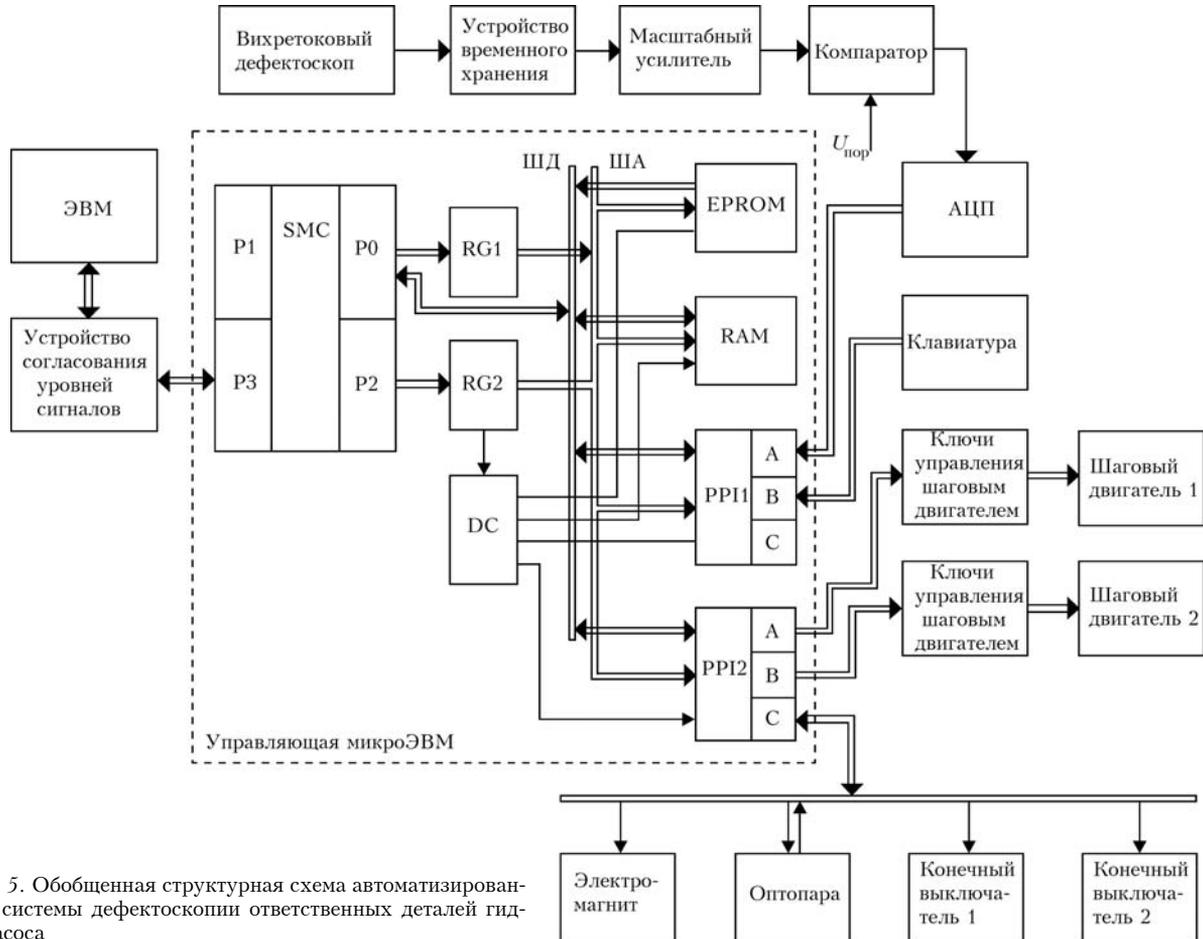


Рис. 5. Обобщенная структурная схема автоматизированной системы дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса



ложение и деталь отбраковывается, что сопровождается звуковой и световой сигнализацией.

Обобщенная структурная схема автоматизированной системы дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса приведена на рис. 5.

Автоматизированная система состоит из следующих функциональных блоков [11]:

вихретокового дефектоскопа;
устройства временного сохранения информации, которая поступила с дефектоскопа;

масштабного усилителя для усиления уровня информационного сигнала;

компаратора, предназначенного для фиксации информации о наличии опасных (критических) дефектов;

управляющей микроЭВМ, которая построена на базе однокристального микроконтроллера (SMC); 8-миразрядных буферных регистров-защелок (RG1, RG2); 8-миразрядного дешифратора адреса (DC); перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (EPROM); запоминающего устройства с произвольной выборкой (RAM); программируемых параллельных интерфейсов ввода-вывода (PPI1, PPI2);

аналого-цифрового преобразователя (АЦП); шагового двигателя 1, вращающего деталь; шагового двигателя 2, который перемещает ВТП поступательно по радиусу от периферии к центру контролируемой детали;

ключей управления шаговым двигателем 1 и шаговым двигателем 2;

электромагнита, предназначенного для опускания и поднятия ВТП относительно контролируемой поверхности;

оптопары, с помощью которой определяется начало отсчета процесса сканирования, а также предназначенная в качестве счетчика оборотов;

клавиатуры для управления автоматизированной системой;

конечных выключателей, предназначенных для отключения шагового двигателя 2 в случае, если ВТП вышел за пределы зоны контроля;

последовательного интерфейса связи, который является также и устройством согласования уровней сигналов между микроЭВМ и персональной ЭВМ.

Выводы

Экспериментальные зависимости вносимых нормированных индуктивностей от соотношения ширины трещины T к диаметру сердечника $D L'_{\text{вн}} = f(T/D)$ при условии $T/D < 0,3$ для П-образного и стержневого ВТП на частотах 1 и 10 кГц близки к линейным.

Зависимости вносимых нормированных индуктивностей $L'_{\text{вн}}$ от соотношения величины зазора δ к диаметру сердечника $D L'_{\text{вн}} = f(T/D)$ при ус-

ловии $\delta/D < 0,3$ для П-образного и стержневого ВТП на частотах 1 и 10 кГц являются гиперболическими.

Экспериментальные кривые аппроксимированы методом наименьших квадратов, определены коэффициенты функциональных зависимостей вносимых нормированных индуктивностей. По результатам исследований избрана рабочая частота 10 кГц.

Разработан резонансный вихретоковый дефектоскоп с отстройкой от влияния зазора и сканирующее микропроцессорное устройство.

Автоматизированная система вихретокового контроля нарушений сплошности ответственных деталей гидронасоса прошла производственные испытания на ВАТ «Гидросила».

1. Учинин В. Н. Методы количественного вихретокового контроля с определением параметров дефектов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 1. — С. 33–38.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справ.: В 2 кн. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. — Т. 2. — 352 с.
3. Сербренніков С. В., Трушаков Д. В., Медяник В. Г. Порівняльні дослідження неруйнівних методів контролю для дефектоскопії деталей аксіально-поршневих машин // Мат. 3-ї Української наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика-2000». — Дніпропетровськ. — 2000. — С. 187–188.
4. Сербренніков С. В., Трушаков Д. В. Дослідження вихорструмових перетворювачів з П-подібним та стержневим осерддям // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Вип. 10. 36. наук. праць Фіз.-мех. ін-ту ім. Г. В. Карпенка НАН України. — Львів. — 2005. — С. 126–130.
5. Gamaliy V. F., Serebrennikov S. V., Trushakov D. V. Simulation of u-type core eddy-current transformer located on ferromagnetic material with «crack type» defects // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. — Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2005. — P. 349–352.
6. Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1980. — 232 с.
7. Декларацийний патент 34933А Україна, МКИ G01N27/86. Спосіб повного відстроювання від впливу проміжку у вихорструмовій дефектоскопії феромагнітних виробів / Б. І. Ващенко, Д. В. Трушаков. — Кіровоград. держ. техн. ун-т. — № 99074185. Заявл. 20.07.1999. Опубл. 15.03.2001.
8. Патент на винахід 62570 Україна; МКИ G01N27/00, G01N27/90. Вихорструмовий дефектоскоп для контролю металевих виробів / В. Ф. Гамалій, В. Ф. Пащенко, Д. В. Трушаков. — Кіровоград. держ. техн. ун-т. — № 2003043228. Заявл. 10.04.2003. Опубл. 15.07.2005.
9. Плещиков П. Г., Сербренніков С. В., Трушаков Д. В. Вихорструмовий дефектоскоп та сканувальний пристрій для поточного контролю металевих виробів форми тіл обертання // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2000. — № 1. — С. 70–71.
10. Gamaliy V., Trushakov D. Microprocessor System for Non-Destructive Diagnostics // 15-th Conference on Non-Destructive Testing. — Rome (Italy) — 15–21 October 2000. — P. 608.
11. Гамалій В. Ф., Трушаков Д. В. До вибору методик автоматизації неруйнівного контролю // Зб. наук. праць Кіровоград. держ. техн. ун-ту / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. — Кіровоград: КДТУ. — 2002. — Вип. 11. — С. 247–250.