

Устройство вихретокового контроля чистоты рабочей жидкости

И. А. КУДРЯВЦЕВ, С. А. ГУДКОВ, Н. В. СЕЛИВАНОВ

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королёва, Самара, Россия, e-mail: gudkov.stanislav@google.com

Описан принцип построения вихретокового детектора для контроля чистоты рабочей жидкости гидравлических систем и авиационных двигателей. Параметры примесных частиц измеряются с помощью вихретокового преобразователя, включённого в автогенераторную схему. Приведены результаты экспериментов с частицами меди и стали марки ШХ-15. Получена оценка предельной чувствительности детектора по диаметру регистрируемых частиц.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, гидравлическая система, примесная частица износа, автогенераторная схема, вихретоковый преобразователь, конечно-элементное моделирование.

Design principles for the eddy-current equipment intended for the hydraulic fluid purity monitoring in the air jets and other types of hydraulic machines are described. Measurement of impurity wear particles parameters is carried out by an eddy-current transducer, which is a part of an active oscillator circuit. Experimental results with wear steel and copper particles are given. An estimation of the ultimate sensitivity of equipment as a minimal detectable particle diameter was obtained.

Key words: eddy-current monitoring, hydraulic system, impurity wear particle, active oscillator circuit, eddy-current transducer, finite-element modeling.

Обеспечение безаварийности полетов авиации является важной практической задачей. Безаварийность полетов зависит от надёжности и долговечности авиационных двигателей, а также гидравлических систем авиационного судна. Анализ причин выхода из строя двигателей показывает, что наиболее распространён износ трением подвижных сопряжений (в том числе подшипников качения) рабочих органов [1]. Непосредственный контроль процесса износа не всегда возможен. Поэтому используют косвенные методы контроля, например анализ продуктов износа, содержащихся в масле, омывающем трущиеся поверхности. В настоящее время для раннего обнаружения дефектов в узлах трения применяют наземное исследование проб масла (отбор проб) и непрерывный анализ циркулирующего масла с помощью датчиков встроенного контроля (ДВК). В [2] рассмотрены существующие ДВК и показана целесообразность разработки детекторов металлических частиц на основе вихретоковых преобразователей (ВТП). Это обусловлено следующими особенностями ВТП: реакцией на частицы только из проводящих материалов; возможностью различать частицы из магнитных и немагнитных материалов; широким диапазоном рабочих температур; слабой зависимостью выходного сигнала от воздушных пузырей, содержащихся в рабочей жидкости.

Целью данной работы является разработка и оценка метрологических характеристик устройства – детектора металлических частиц на основе ВТП.

Структурная схема устройства. Вихретоковый метод контроля металлических частиц в непроводящей или слабопроводящей жидкости заключается в возбуждении в зоне контроля первичного электромагнитного поля и измерении вторичного электромагнитного поля контролируемой метал-

лической частицы. В рассматриваемом случае ВТП представляет одну катушку индуктивности, характеризующуюся комплексным сопротивлением. Комплексное сопротивление является сложной функцией геометрических и электромагнитных параметров ВТП и контролируемых частиц.

Вихретоковые чувствительные элементы подразделяют на две группы: параметрические и трансформаторные. При использовании параметрических элементов измерительные цепи строят по схемам измерителей комплексных сопротивлений, при использовании трансформаторных элементов – по схемам измерителей напряжений, позволяющих измерять амплитуду и фазу вносимого напряжения [3].

К особому классу относятся автогенераторные вихретоковые измерители, в которых измерительные цепи строятся по принципам измерительных автогенераторов. Данные измерители обладают высокой чувствительностью к изменениям параметров объекта измерения, но требуют применения достаточно сложных корректирующих устройств, устраняющих неустойчивость вследствие положительной обратной связи [1].

Предельное значение относительного вносимого сопротивления $Z_{отн}$ для амплитудно-фазовых способов измерений составляет примерно 10^{-4} , для автогенераторных схем включения ВТП – не более 10^{-5} [3].

В силу небольших размеров объектов контроля (характерный размер частиц износа составляет десятки микрометров) в рассматриваемом классе задач и, как следствие, малости вносимых параметров, предлагается применять измерительную схему, построенную по принципу измерительного автогенератора с параметрическим ВТП. Структурная схема устройства с обозначением используемых цифровых интерфейсов приведена на рис. 1. Активный элемент со-

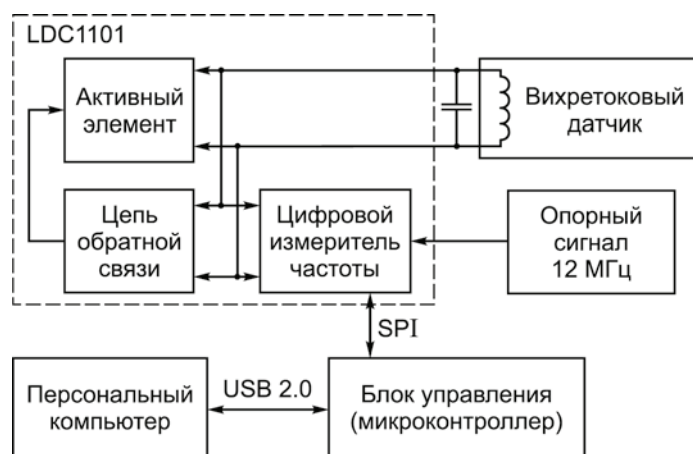


Рис. 1. Структурная схема детектора металлических частиц на основе вихретоковых преобразователей

вместно с цепью обратной связи формирует гармонические колебания в резонансном контуре. Цифровой измеритель частоты отсчитывает такты внешнего опорного сигнала и сравнивает полученное значение с периодом колебаний сигнала в резонансном контуре. При попадании объекта контроля в поле ВТП изменяется индуктивность датчика, что приводит к изменению периода колебаний сигнала в контуре. Данное изменение периода фиксируется цифровым измерителем частоты и затем преобразуется в текущую индуктивность ВТП.

Схемы автогенератора и цифрового измерителя частоты экспериментальной установки реализованы с помощью интегральной микросхемы LDC1101 (Texas Instruments, США). Для организации интерфейса взаимодействия между персональным компьютером и указанной микросхемой, а также для управления микросхемой используется микрокон-

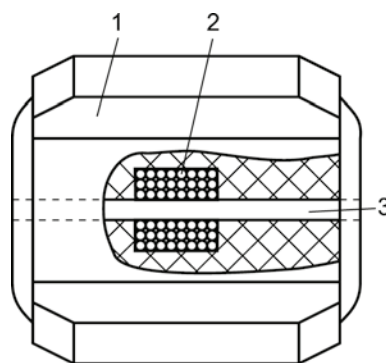


Рис. 2. Конструкция проходного вихретокового преобразователя:
1 – стакан; 2 – катушка индуктивности; 3 – пробоотборный канал

троллер серии MSP430F55xx. Для потокового считывания данных с микросхемы LDC1101 на языке Python 3.4 была написана программа, позволяющая провести первичную инициализацию микросхемы, а также сохранение данных в файл на жёстком диске. Обработка данных проводилась в математическом пакете MATLAB 8.5.

Вихретоковый преобразователь. В настоящее время эффективным инструментом для анализа сложных электромагнитных систем является численное моделирование. Вносимое в ВТП сопротивление находили методом конечно-элементного моделирования (КЭМ). Численный расчёт электромагнитной системы «ВТП – частица износа» осуществлялся в программном пакете Ansys Maxwell 16.2. В процессе анализа исследовали влияние различных материалов, а также размеров частиц износа на индуктивности ВТП. Результаты сравнительного анализа расчётной модели приведены в таблице.

Для верификации результатов численного расчёта был изготовлен ВТП проходного типа со следующими параметрами: диаметр обмоточного медного провода 0,1 мм; количество витков 44; длина намотки 2 мм; внутренний диаметр намотки 0,8 мм; собственная индуктивность 1,31 мкГн; активное сопротивление 0,941 Ом. Конструкция данного ВТП показана на рис. 2 и состоит из пластикового стакана 1, изготовленного с применением аддитивных технологий, и катушки индуктивности 2, помещённой внутрь стакана и залитой эпоксидной смолой. Через ось симметрии ВТП проходит сквозной пробоотборный канал 3 для прокачки рабочей жидкости с образцами частиц. Образцы частиц износа отбирали с использованием микроскопа Olympus Vaox и объект-микрометра с абсолютной погрешностью не более 15 мкм. Для проведения измерений в статике отобранные образцы приклеивали на торец нейлоновой лески диаметром 0,3 мм. Центровку частиц контролировали визуально, точность позиционирования составляла не менее 50 мкм. В процессе эксперимента частицы на леске вносили в чувствительный объём ВТП и удаляли из него. В каждый момент времени внутри чувствительного объёма находилась только одна частица. Собственное влияние лески на вносимую в ВТП индуктивность незначительно (менее случайной составляющей погрешности измерений).

Сравнение данных КЭМ с экспериментальными результатами измерения вносимой индуктивности

Материал частицы	Размер частиц, мкм	Относительная вносимая индуктивность		Расхождение результатов, %
		Модель	Эксперимент	
ШХ-15	30	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$	5,5
ШХ-15	50	$7,16 \cdot 10^{-5}$	$7,18 \cdot 10^{-5}$	0,3
ШХ-15	75	$2,24 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	22,7
ШХ-15	90	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$4,68 \cdot 10^{-4}$	10,1
ШХ-15	105	$6,71 \cdot 10^{-4}$	$8,28 \cdot 10^{-4}$	23,4
ШХ-15	120	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$9,34 \cdot 10^{-4}$	6,6
Медь	77	$-2,60 \cdot 10^{-5}$	$-2,68 \cdot 10^{-5}$	3,0
Медь	103	$-1,20 \cdot 10^{-4}$	$-1,14 \cdot 10^{-4}$	5,2
Медь	112	$-1,75 \cdot 10^{-4}$	$-1,61 \cdot 10^{-4}$	7,8
Медь	125	$-2,82 \cdot 10^{-4}$	$-2,57 \cdot 10^{-4}$	8,9

Совпадение экспериментальных данных с результатами КЭМ (см. таблицу) подтверждает обоснованность применения КЭМ для анализа системы «ВТП – частица», а также соответствие параметров конечно-элементной модели датчика и реального образца ВТП.

Законы изменения относительной вносимой индуктивности $Z_{\text{отн}}$ от характерного размера D частицы в пределах рассматриваемого (см. таблицу) диапазона размеров частиц стали марки ШХ-15 и меди, соответственно, имеют вид

$$Z_{\text{отн}}(D) = 0,53D^{2,974}, \quad (1)$$

$$Z_{\text{отн}}(D) = -e^{-405,29D^2 + 131,396D - 18,27}. \quad (2)$$

Заметим, что в (1), (2) под относительной вносимой индуктивностью понимается абсолютная внесённая индуктивность, отнесённая к собственной начальной индуктивности ВТП.

Метрологические характеристики ВТП. В настоящем исследовании требовались измерения краткосрочных изменений индуктивности, а не её абсолютных значений, поэтому погрешностями, вызванными отклонением ёмкости конденсатора контура от номинального значения, температурным дрейфом источника опорного сигнала и подобными, пренебрегали.

Интегральная микросхема LDC1101 измеряет частоту колебаний сигнала в колебательном контуре путём сравнения с опорным сигналом. Затем на основе измеренной частоты колебаний в контуре и известной ёмкости конденсатора контура вычисляется собственная индуктивность ВТП. В технической документации на данную микросхему приведена формула преобразования, выражающая частоту f колебаний в контуре через опорную частоту $f_{\text{оп}}$ и 24-разрядный код N , формируемый в регистре преобразования:

$$f = Nf_{\text{оп}}/2^{21}. \quad (3)$$

В соответствии с формулой Томпсона индуктивность параллельного колебательного контура выражается в виде

$$L = 0,25\pi^{-2}f^{-2}C^{-1}, \quad (4)$$

где C – ёмкость контурного конденсатора.

После подстановки (3) в (4) ёмкость определяется как

$$L = 2^{42}0,25\pi^{-2}f^{-2}N^{-2}C^{-1}. \quad (5)$$

Исключим переменную N из выражения частной производной $\partial L/\partial N$ от (5) и выведем формулу для нахождения погрешности квантования:

$$\Delta L_{\text{кв}} = \left| \frac{\partial L}{\partial N} \right| = \left| -\frac{\pi f_{\text{оп}} L^{3/2} C^{1/2}}{2^{19}} \right|. \quad (6)$$

Подставим в (6) параметры предлагаемого ВТП и получим

$$\Delta L_{\text{кв}} = \pi 2^{-19} \cdot 1,2 \cdot 10^7 \cdot (1,315 \cdot 10^{-6})^{3/2} \times \\ \times (2,2 \cdot 10^{-10})^{1/2} \approx 1,6 \text{ пГн.}$$

Таким образом, максимальное разрешение (погрешность квантования) зависит от параметров системы и составляет 1,6 пГн для рассматриваемого случая.

Для нахождения итоговой погрешности измерения также важно оценить характер и уровень шума измерений. Для этого исследована выборка из 600 отсчётов шума на выходе ВТП. По критерию К-squared [4] данная выборка распределена в соответствии с нормальным законом. Поэтому для оценки случайной погрешности можно использовать квантили распределения Стюдента. Тогда итоговая формула случайной погрешности $\Delta L_{\text{сл}}$ примет вид

$$\Delta L_{\text{сл}} = S_L t_{0,95;(M-1)} = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{k=1}^M \left(L_k - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M L_k \right)^2 t_{0,95;(M-1)}, \quad (7)$$

где S_L – средняя квадратическая погрешность среднего арифметического результата измерения; $t_{\alpha;n}$ – α -квантиль распределения Стюдента для n степеней свободы; M – количество измерений индуктивности; L_k – результат k -го измерения индуктивности.

В соответствии с (7) случайная погрешность измерений составила минимум 5,6 пГн.

Итоговая предельная теоретическая погрешность измерения изменения индуктивности при внесении частицы с учётом погрешности квантования:

$$\Delta L = \sqrt{(\Delta L_{\text{кв}})^2 + (\Delta L_{\text{сл}})^2} \approx 5,8 \text{ пГн.}$$

Сравнение экспериментальных данных с результатами КЭМ. На рис. 3 приведены зависимости относительной вносимой индуктивности от размера частицы износа для разных материалов, кривые построены на основе интерпо-

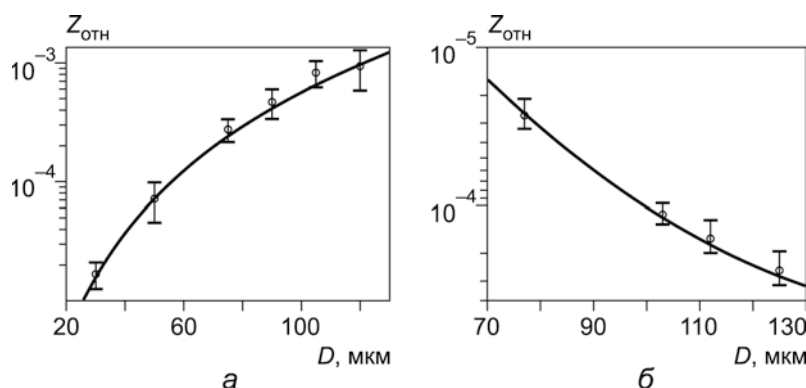


Рис. 3. Сравнение результатов КЭМ и эксперимента для магнитного материала – стали марки ШХ-15 (а) и немагнитного материала – меди (б); кривые – результаты моделирования, точки – экспериментальные значения с отмеченными доверительными интервалами

ляции данных КЭМ, точками показаны экспериментальные значения с отмеченными доверительными интервалами. Данные моделирования совпадают с экспериментальными значениями в пределах 23 % для частиц стали марки ШХ-15 и в пределах 9 % для частиц меди, что является достаточным для инженерной практики результатом.

Определим минимальный размер детектируемых частиц стали марки ШХ-15 и меди. Для этого зададимся вероятностью ошибки $P=0,05$. Так как основной вклад в погрешность прибора вносит случайная погрешность, представляющая нормально распределённый шум со средним квадратическим отклонением $\sigma=2,5$ пГн, то минимальное детектируемое с вероятностью $(1-P)$ изменение индуктивности d получают из решения уравнения

$$P=1-\text{erf}[d/(\sigma\sqrt{2})],$$

где $\text{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция ошибок (функция Лапласа).

Численное решение уравнения позволяет получить $d=4,9$ пГн для $P=0,05$. Согласно выражениям (1), (2) при таком изменении индуктивности определяются частицы стали и меди размерами 20 и 55 мкм, соответственно. Эти значения и являются теоретическим порогом чувствительности данного прибора.

Заключение. Предложен вихретоковый датчик металлических частиц износа в рабочих жидкостях гидравлических систем. На основе конечно-элементного анализа модели «ВТП – частица износа» получены выходные амплитудные характеристики датчика. С целью подтверждения теоретиче-

ских результатов собран измерительный стенд и поставлен ряд экспериментов для случая статического нахождения частицы износа внутри чувствительного объёма ВТП. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превысило 23 и 9 % для частиц стали и меди, соответственно. На основе экспериментально найденных параметров шума на выходе ВТП показано, что порог чувствительности данного прибора составляет 20 мкм для ферромагнитных частиц и 55 мкм для частиц из немагнитных материалов.

Л и т е р а т у р а

1. **Дроков В. Г.** Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов: Автореф. дисс. на соиск. степ. док. техн. наук. М., ГосНИИГА, 2009.
2. **Логвинов Л. М.** Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости. М.: ЦНТИ «ПОИСК», 1992.
3. **Ляченков Н. В.** Вихретоковые контрольно-измерительные модули систем управления технологическими процессами: Автореф. дисс. на соиск. степ. докт. техн. наук. Самара, 2000.
4. **D'Agostino R. B., Belanger A., D'Agostino R. B. Jr.** A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality // The American Statistician. 1990. № 4. С. 316–321.

Дата принятия: 24.10.2017.