

06, июнь 2016

УДК 620.179.14

Разработка измерительной системы определения трещин валопроводов в процессе эксплуатации

Куропаткина К. М., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»*

*Научный руководитель: Кошкин А. С., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»*

bauman@bmstu.ru

Все элементы машин рассчитываются на одинаковый срок службы, по истечении которого наступает их физический износ. На практике часто приходится встречаться с тем, что отдельные части изделий выходят из строя раньше срока. Причиной этого, как правило, являются дефекты.

В настоящее время существует множество методов неразрушающего контроля валопроводов, но у них есть один существенный недостаток, все эти методы нельзя применять к вращающемуся валу. Поэтому важен вопрос о создании системы определения трещин валопроводов в процессе их эксплуатации.

Для обнаружения дефектов валов используют такие методы неразрушающего контроля, как визуально-оптический, цветной (капиллярный), магнитопорошковый, вихретоковый, ультразвуковой и акустико-эмиссионный [1].

Рассмотрев и проанализировав эти методы неразрушающего контроля, приходим к выводу, что их можно использовать только при неподвижном состоянии вала. Каким же образом можно осуществить контроль вращающегося вала? Для решения этого вопроса на основе рассмотренных методов был разработан новый подход – высокочастотный. Одним из важных преимуществ и отличий данного подхода является определение дефектов движущихся частей (вращающихся валопроводов) в процессе эксплуатации.

Для реализации высокочастотного подхода разработана структурная схема, на которой показаны основные функциональные части устройств, их назначение и взаимосвязь. Данная схема представлена на рис. 1.

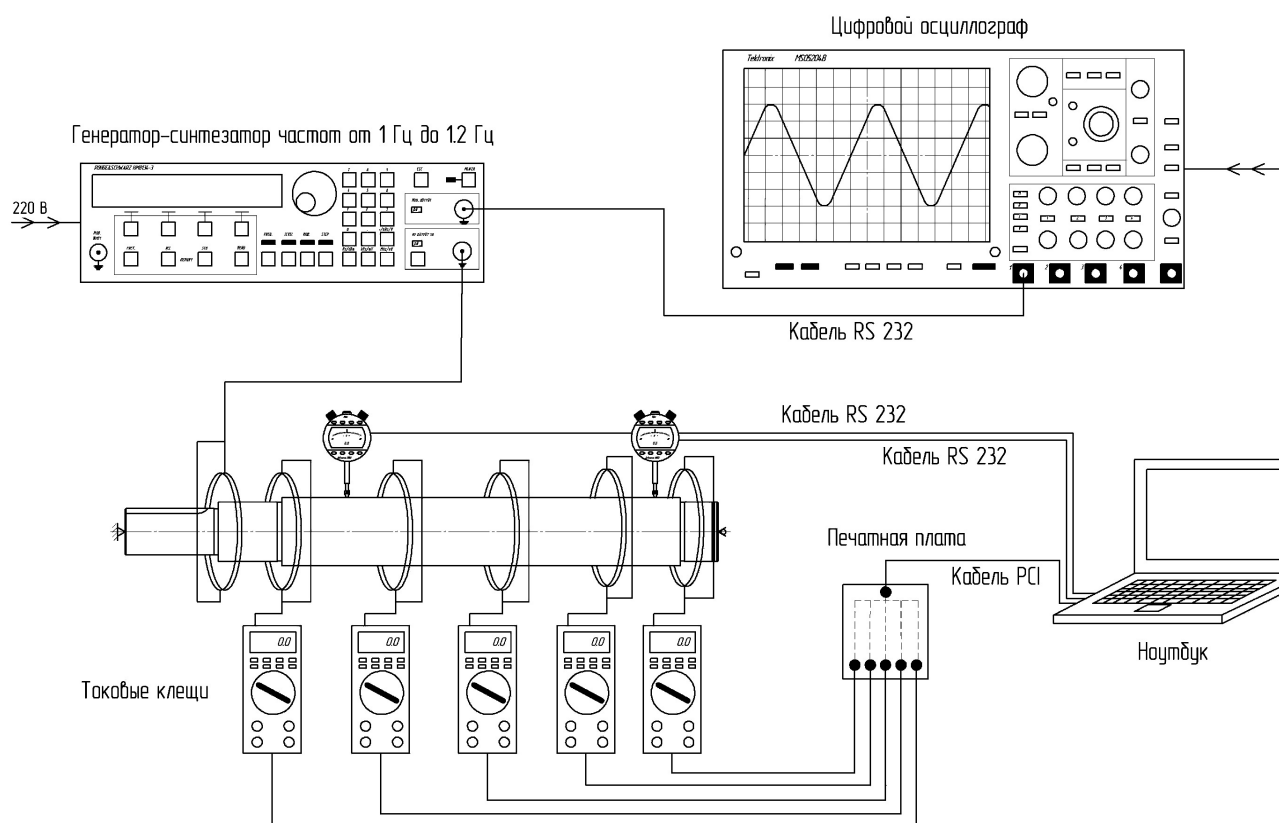


Рис. 1. Структурная схема реализации высокочастотного подхода неразрушающего контроля

Она содержит в себе высокочастотный генератор НМ8134-3 [3], который соединен с осциллографом MS05204B [4] при помощи кабеля RS 232, а также подведен к валу электродвигателя при помощи подводящих клещей. Вал закреплен в трехкулачковом патроне и вращается при проведении операции контроля. По всей длине вала расположены токовые клещи с датчиком Холла, которые снимают показания силы тока и полученные результаты с помощью печатной платы и кабеля PCI сводятся в программное обеспечение компьютера.

В данной статье представлен расчет и анализ размеров трещин, которые возможно обнаружить при помощи высокочастотного подхода.

В основе расчета размеров трещин лежит теория об уменьшении силы проходящего через вал тока при столкновении с дефектом (трещиной). Для теоретического расчета было выбрано электрическое сопротивление [5].

Чаще всего валы изготавливают из сталей, которые относятся к металлам. Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока — электронов проводимости, образующихся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определённому атому.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле (1.1):

$$R_n = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (1.1)$$

где ρ – удельное сопротивление вещества проводника, Ом·м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, м²

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью (удельной электропроводностью). В отличие от электрического сопротивления, являющегося свойством проводника и зависящего от его материала, формы и размеров, удельное электрическое сопротивление является свойством только вещества.

Связь между удельным сопротивлением ρ и удельной проводимостью σ выражается равенством:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (1.2)$$

где σ – удельная проводимость, См/м

Для стали удельная проводимость $\sigma = 7,69 \cdot 10^6$ См/м, тогда удельное сопротивление по формуле (1.2) равно:

$$\rho = \frac{1}{7,69 \cdot 10^6} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Рассмотрим вал, у которого диаметр равен 80 мм, длина 117 мм. Для него проведем расчет электрического сопротивления, при условии однородности вала и отсутствия в нем дефектов.

Так как вал является цилиндром, то площадь поперечного сечения определяется по формуле:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (1.3)$$

Исходные параметры:

$$\rho = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad l = 117 \text{ мм} = 0,117 \text{ м}; \quad d = 80 \text{ мм} = 0,08 \text{ м}$$

По формуле (1.3) найдем площадь поперечного сечения вала:

$$S = 3,14 \cdot 0,04^2 = 0,005024 \text{ м}^2$$

Вычислим электрическое сопротивление по формуле (1.1):

$$R_n = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024} = 3,0275 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Выведем формулу для электрического сопротивления с присутствием в вале дефектов:

$$R_{нт} = \frac{\rho \cdot l}{S - S_{трещ}}$$

Для определения трещины по изменению электрического сопротивления будем использовать цифровой микроомметр DLRO600. В соответствии со способностью прибора улавливать сопротивление от 10^{-7} Ом проведем расчет минимального размера трещины, который может быть обнаружен им. Площадь трещины будет определяться по формуле:

$$S_{трещ} = S - \frac{\rho \cdot l}{R_{нт}} \quad (1.4)$$

Изменим значение сопротивления на 10^{-7} Ом, получим $R_{нт} = 3,1000 \cdot 10^{-6}$ Ом, отсюда следует по формуле (1.4) минимальная площадь трещины равна:

$$S_{трещ} = 0,005024 - \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{3,1000 \cdot 10^{-6}} = 0,005024 - 0,004906 = 0,000118 \text{ м}^2$$

В зависимости от геометрического вида трещины определим ее габаритные размеры.

Если трещина имеет форму треугольника, то ее площадь равна: $S = \frac{1}{2} a \cdot h$

Если трещина имеет форму прямоугольника, то ее площадь равна: $S = a \cdot b$

Найдем минимальный размер дефектов:

- треугольная форма: $a(h) = \sqrt{2 \cdot S} = \sqrt{2 \cdot 118} = 15 \text{ мм}$

- прямоугольная форма: $a(b) = \sqrt{S} = \sqrt{118} = 11 \text{ мм}$

Рассмотрим, как зависит сопротивление от размера дефекта. Зададим диапазон расчета от 10 до 30 мм с шагом 4 мм.

Размер дефекта – 10 мм:

- треугольная форма трещины: $S = \frac{1}{2} 10 \cdot 10 = 50 \text{ мм}^2 = 0,00005 \text{ м}^2$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,00005} = 3,0579 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма:

$$S = 10 \cdot 10 = 100 \text{ мм}^2 = 0,0001 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,0001} = 3,0890 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Размер дефекта – 14 мм:

- треугольная форма трещины:

$$S = \frac{1}{2} 14 \cdot 14 = 98 \text{ мм}^2 = 0,000098 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000098} = 3,0877 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма:

$$S = 14 \cdot 14 = 196 \text{ мм}^2 = 0,000196 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000196} = 3,1504 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Размер дефекта – 18 мм:

- треугольная форма трещины:

$$S = \frac{1}{2} 18 \cdot 18 = 162 \text{ мм}^2 = 0,000162 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000162} = 3,1283 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма:

$$S = 18 \cdot 18 = 324 \text{ мм}^2 = 0,000324 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000324} = 3,2362 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Размер дефекта – 22 мм:

- треугольная форма трещины:

$$S = \frac{1}{2} 22 \cdot 22 = 242 \text{ мм}^2 = 0,000242 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000242} = 3,1807 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма:

$$S = 22 \cdot 22 = 484 \text{ мм}^2 = 0,000484 \text{ м}^2$$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000484} = 3,3502 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Размер дефекта – 26 мм:

- треугольная форма трещины: $S = \frac{1}{2} 26 \cdot 26 = 338 \text{ мм}^2 = 0,000338 \text{ м}^2$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000338} = 3,2458 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма: $S = 26 \cdot 26 = 676 \text{ мм}^2 = 0,000676 \text{ м}^2$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,000676} = 3,4982 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Размер дефекта – 30 мм:

- треугольная форма трещины: $S = \frac{1}{2} 30 \cdot 30 = 450 \text{ мм}^2 = 0,00045 \text{ м}^2$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,00045} = 3,3253 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

- прямоугольная форма: $S = 30 \cdot 30 = 900 \text{ мм}^2 = 0,0009 \text{ м}^2$

$$R_{нт} = \frac{0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,117}{0,005024 - 0,0009} = 3,6882 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

В соответствии с проведенными расчетами составлен график зависимости сопротивления от размера трещины, представленный на рис. 2.

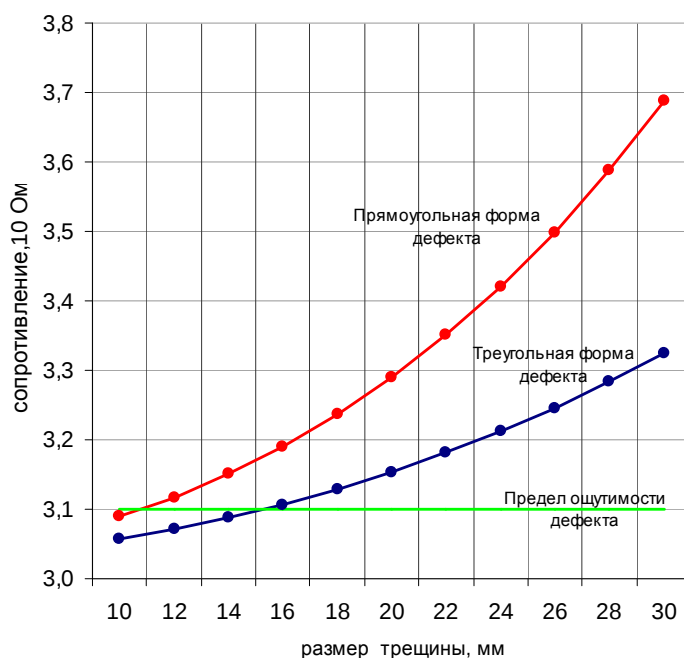


Рис. 2. График зависимости сопротивления от размера дефекта

Проведем расчет глубины скин-слоя по следующей формуле [6]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$$

где $\omega = 2\pi \cdot f$ – круговая частота, рад/с

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума

σ – проводимость материала, См/м (для стали $\sigma = 7,69 \cdot 10^6$ См/м)

Проведем расчет для диапазона частот от 100 КГц до 100 МГц.

$\omega = 100$ КГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{606,6 \cdot 10^4}} = 0,000574 м = 574 мкм$$

$\omega = 500$ КГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{3033 \cdot 10^4}} = 0,000257 м = 257 мкм$$

$\omega = 1$ МГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{606,6 \cdot 10^5}} = 0,000182 м = 182 мкм$$

$\omega = 10$ МГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{606,6 \cdot 10^6}} = 0,000057 м = 57 мкм$$

$\omega = 50$ МГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{3033 \cdot 10^6}} = 0,000026 м = 26 мкм$$

$\omega = 100$ МГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 7,69 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{2}{606,6 \cdot 10^7}} = 0,000018 м = 18 мкм$$

График зависимости глубины скин-слоя от значения частоты показан на Рисунке 3.

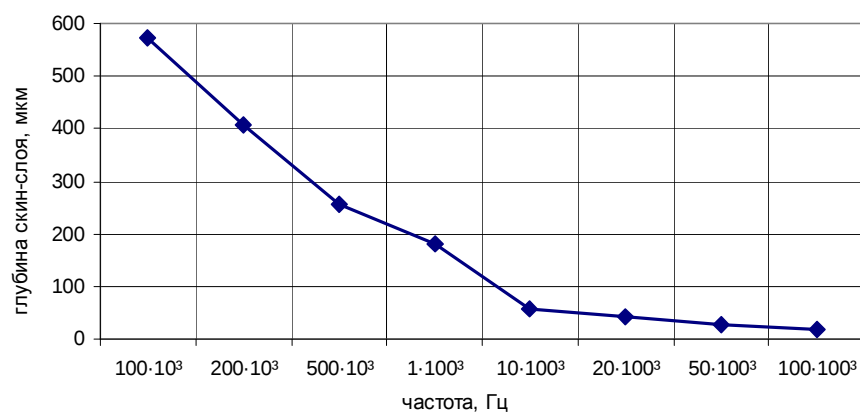


Рис. 3. График зависимости глубины скин-слоя от значения частоты

В данной работе показано применение метода для измерения в процессе эксплуатации поверхностных трещин. Разработана структурная схема для реализации этого метода и проведены расчеты глубины скин-слоя и размеров трещин, которые могут быть обнаружены во вращающемся валопроводе.

В результате проведения расчетов был получен минимально возможный размер трещины, имеющей в поперечном сечении треугольник, которую можно определить, равный 15 мм. Размер трещины, имеющей в поперечном сечении прямоугольник, равен 11 мм. Размеры дефектов можно уменьшить, путем применения оборудования более высокого класса точности, стремящегося к эталону.

По результатам расчетов также была получена возможная глубина скин-слоя при токах высокой частоты в диапазоне от 100 КГц до 100 МГц. По глубине скин-слоя возможно определить внутренние дефекты материала.

Совокупность этих расчетов дает возможность определить зарождение трещин, несплошностей на поверхности объекта исследования.

Список литературы

- [1]. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 1. Общие вопросы. М.: Высш. школа, 1992. 283 с.
- [2]. Фирсов А.М. Основы неразрушающего контроля материалов и деталей машин: Учебное пособие. СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2009. 51 с.
- [3]. Каталог продукции фирмы Rohde&Schwarz. Режим доступа: <http://www.rohde-schwarz.ru/products/> (дата обращения 08.04.2016).
- [4]. Каталог приборов фирмы Tektronix. Режим доступа: <http://ru.tek.com/products> (дата обращения 08.04.2016).

- [5]. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1983. 463 с.
- [6]. Рей Ридли. Потери в обмотках вследствие эффекта близости // Современная электроника. 2005. № 6. С. 60-64
- [7]. Козлов В.И. Скин-эффект в цилиндрическом проводнике // Физическое образование в ВУЗах. 2002. № 3. С. 24-269.
- [8]. Филонович А.В., Колмыков В.И. К использованию скин-эффекта для вихретокового контроля металлических изделий цилиндрической формы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 5. С. 89-93
- [9]. Филонович А.В., Колмыков В. И. Диагностика металлических изделий цилиндрической формы на основе скин-эффекта // Электрика. 2015. № 1. С. 7-10