Результаты теоретического исследования хорошо совпадают с экспериментом, проведенном на специально разработанной установке.

Л И Т Е Р А Т У Р А

I. Капитонова Л.М., Старобинский Н.М. Измерительный магнитно-транзисторный преобразователь напряжения в частоту. "Приборы и системы управления", 1972, № II.

2. Ильинский Н.Ф., Михайлов В.Б. Транзисторно-магнитные преобразователи непрерывного сигнала в последовательность импульсов. 1966.

УДК 620.179.14

В.А.Денисов, В.А.Шарков, О.О.Сильченко

ЛОКАЛЬНОСТЬ И ПОГРЕШНОСТЬ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

Одним из важнейших параметров вихретокового метода контроля, от которого зависит погрешность измерения, является локальность.

Локальность характеризует размеры области, в которой возбуждено анализируемое поле. Учитывая поглощение электромагнитной энергии в изделии, следует определить локальность как размеры области, излучение из которой выходит наружу из изделия. При вихретоковом методе контроля интерес представляет поверхностная локальность – размер части излучающей области, выходящей на поверхность изделия.

При допускаемой погрешности измерения γ в качестве меры поверхностной локальности следует принять размер области изделия, из которой выходит ($1-\gamma$) возбужденной в нем электромагнитной мощности [I] .

$$P=\frac{1}{\sigma}\int_{v} J\overset{*}{J}\,dv, \qquad (I)$$

где σ – электропроводность изделия; J – плотность вихревых токов, наводимых в изделии; $\overset{*}{J}$ – сопряженная ей величина; v –объём возбужденной электромагнитной области.

Плотность вихревых токов определяется соотношением

$$J=-j\omega\sigma A, \qquad (2)$$

где A – магнитный потенциал поля в проводящем изделии; ω – угловая частота питания преобразователя.

К настоящему времени решен обширный класс электродинамических задач для вихретоковых преобразователей различного типа [2,3] ,где получены точные и приближенные соотношения для A , и расчет зоны локальности не вызывает практических затруднений.

Определим связь локальности и погрешности измерения γ при контроле какого-либо параметра (электрофизического или геометрического) изделия по направлению ℓ , что позволит, в конечном итоге, обоснованно подойти к выбору типа вихретового преобразователя. Сигнал на выходе преобразователя $Q(\ell)=x(\ell)+y(\ell)$ представляет собой случайный процесс, состоящий из суммы детерминированного сигнала $x(\ell)$ и шумов $y(\ell)$. Сигнал $x(\ell)$ – априорно ожидаемый закон изменения параметра контролируемого изделия, $y(\ell)$ – нормальный, дифференцируемый в среднеквадратическом шум с нулевым средним, дисперсией D и корреляционной функцией $K(\ell_0)$. Поскольку быстродействие вихретоковых преобразователей достаточно велико, то время измерения полагаем пренебрежимо малым по сравнению с временем изменения контролируемого параметра. В этом случае $x(\ell)$ представляет собой сигнал на выходе идеального преобразователя (т.е.математическое ожидание контролируемого параметра), а $y(\ell)$ – статические погрешности реального преобразователя.

Разобьем весь интервал изменения контролируемого параметра на K -зон с шириной, равной допускаемой погрешности измерения γ . Следовательно для решения поставленной задачи необходимо определить зону, в которой находится контролируемый параметр.

С целью упрощения дальнейших рассмотрений, представим $Q(\ell)$ в виде квантованной функции с шагом, равным γ . При этом получим ступенчатую функцию с числом ступеней равным числу пересечений уровня Q_{i-1} с положительной производной и Q_i – с отрицательной. Определив число пересечений, найдем минимально необходимую зону локальности и её связь с γ .

Среднее число пересечений n_1 с положительной производной и n_2 – с отрицательной определяется [4] выражениями :

$$n_1=\int_0^L d\ell\int_0^\infty \mathcal{L}(Q_{i-1},\dot{Q})\dot{Q}d\dot{Q},\quad n_2=\int_0^L d\ell\int_0^\infty \mathcal{L}(Q_i\,\dot{Q})\dot{Q}d\dot{Q}, \tag{3}$$

где $\mathcal{L}(Q_i\,\dot{Q})$ – совместная плотность распределения случайного процесса и его производной, L – путь в направлении контроля ℓ .

Суммарное число пересечений для i - зоны равно $n_i = n_1 + n_2$. Для K зон оно равно :

$$n_\Sigma = \sum_{i=1}^{K} n_i = \sum_{i=1}^{K} \int_0^L dl \int_0^\infty [\omega(Q_{i-1}, \dot Q) + \omega(Q_i, \dot Q)] \dot Q \, d\dot Q \tag{4}$$

Следовательно размер минимальной локальной зоны контроля определится соотношением :

$$\Delta_\Lambda = \frac{L}{\sum_{i=1}^{K} \int_0^L dl \int_0^\infty [\omega(Q_{i-1}, \dot Q) + \omega(Q_i, \dot Q)] \dot Q \, d\dot Q} . \tag{5}$$

Для нормального случайного процесса совместная плотность вероятности для совпадающих измерений равна произведению вероятностей [4] :

$$\omega(Q_i \dot Q) = \frac{1}{2\pi D \rho(0)} e^{-\frac{1}{2D^2}(Q_i - x_i)^2} e^{-\frac{1}{2D^2 \rho^2(0)}(\dot Q_i - \dot x_i)^2} \tag{6}$$

где $\rho^2(0) = \frac{1}{D^2}\left[\frac{d^2 K(l_0)}{dl^2}\right]_{l_0 = 0}$

Подставив (6) в (4), получим :

$$n_\Sigma = \frac{1}{2\pi D \rho(0)} \sum_{i=1}^{K} \int_0^L \left[\exp -\frac{1}{2D^2}(Q_{i-1} - x_i)^2 + \exp -\frac{1}{2D^2}(Q_i - x_i)^2\right] dl \int_0^\infty e^{-\frac{(\dot Q - \dot x)^2}{2D^2 \rho^2(0)}} \dot Q \, d\dot Q$$

После ряда несложных преобразований имеем :

$$n_\Sigma = \frac{1}{2\pi D \rho(0)} \sum_{i=1}^{K} \int_0^L \left[\exp -\frac{1}{2D^2}(Q_{i-1} - x_i)^2 + \exp -\frac{1}{2D^2}(Q_i - x_i)^2\right]\left[e^{-\frac{\dot x \sqrt{2\pi}}{2D^2 \rho^2(0)}} + \frac{\dot x \sqrt{2\pi}}{D \rho(0)} \Phi\left(\frac{\dot x}{D \rho(0)}\right)\right] dl, \tag{7}$$

где $\Phi\left(\frac{\dot x}{D \rho(0)}\right)$ - функция Лапласа, которая табулирована [5] .

Выражение

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} D}\left[\exp -\frac{1}{2D^2}(Q_{i-1} - x_i)^2 + \exp -\frac{1}{2D^2}(Q_i - x_i)^2\right]\frac{\delta}{2}$$

- априорная вероятность того, что контролируемый параметр находится в i - зоне. Следовательно, сумма :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} D} \sum_{i=1}^{K} \left[\exp -\frac{1}{2D^2}(Q_{i-1} - x_i)^2 + \exp -\frac{1}{2D^2}(Q_i - x_i)^2\right]\frac{\delta}{2} = 1. \tag{8}$$

С учётом (7) и (8) имеем

$$\Delta_{\lambda}=\frac{\lambda}{\frac{\mathcal{D}\rho(0)}{\sqrt{2\pi}}\,\frac{2}{\delta}\int\limits_{0}^{\lambda}\Big[e^{-\frac{\dot{x}^{2}}{2\mathcal{D}^{2}\rho^{2}(0)}}+\sqrt{2\pi}\,\frac{\dot{x}}{\mathcal{D}\rho(0)}\,\Phi\Big(\frac{\dot{x}}{\mathcal{D}\rho(0)}\Big)\Big]d\ell} \tag{9}$$

Это соотношение позволяет определить минимально необходимую зону локальности при различных законах изменения контролируемого параметра.

Пусть априорно ожидаемым законом изменения параметра контролируемой поверхности (при её развертке по длине ℓ) является $x(\ell)=B\sin\Omega\ell$, характерным для большинства практических случаев (например, измерение геометрии вращающихся тел накладными преобразователями).

Обозначив $\Omega\ell=\varphi$, получим

$$x(\ell)=B\sin\varphi,\quad \dot{x}(\ell)=B\Omega\cos\varphi,\quad d\ell=\frac{d\varphi}{\Omega},\quad \lambda=2\pi \tag{I0}$$

Подставив (I0) в (9), имеем

$$\Delta_{\lambda}=\frac{\pi\sqrt{2\pi}}{\frac{\mathcal{D}\rho(0)}{\Omega\delta}\int\limits_{-\pi}^{\pi}\Big[e^{-\frac{a^{2}\cos^{2}\varphi}{2}}+\sqrt{2\pi}\,a\cos\varphi\cdot\Phi(a\cos\varphi)\Big]d\varphi} \tag{II}$$

где $a=\frac{B\Omega}{\mathcal{D}\rho(0)}$ или

$$\Delta_{\lambda}=\frac{\pi\sqrt{2\pi}}{\frac{\mathcal{D}\rho(0)}{\Omega\delta}\int\limits_{-\pi}^{\pi}F_{1}\Big(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};-\frac{a^{2}\cos^{2}\varphi}{2}\Big)d\varphi}, \tag{I2}$$

$F_{1}\big(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};-\frac{a^{2}\cos^{2}\varphi}{2}\big)$ – вырожденная гипергеометрическая функция [6].

Раскладывая эту функцию в ряд, получим

$$F_{1}\Big(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};-\frac{a^{2}\cos^{2}\varphi}{2}\Big)=1+\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2k+1)(k+1)!}\Big(\frac{a^{2}\cos^{2}\varphi}{2}\Big)^{k+1}\times(-1)^{k}. \tag{I3}$$

Для приближенного расчета достаточно ограничиться двумя членами ряда (I3). Подставив (I3) в (I2) и произведя интегрирование, получим

$$\Delta_{\lambda}=\frac{\sqrt{2\pi}\;\Omega\delta}{2\mathcal{D}\rho(0)\big(1+\frac{a^{2}}{4}\big)}. \tag{I4}$$

Практически для вихретоковых преобразователей и реальных случаев контроля имеем $a > 1$. Следовательно, соотношение (I4) можно упростить (пренебрегая I по сравнению с $\frac{a^2}{4}$) и записать в виде

$$\Delta_{\Lambda} = \frac{2\sqrt{2\pi}\,\gamma\mathcal{D}\rho(0)}{B^2\,\Omega}. \tag{I5}$$

Следовательно минимально необходимая при контроле зона локальности пропорционально связана с допускаемой погрешностью измерения и шумом вихретокового преобразователя. Кроме того, на выбор зоны локальности существенно влияет характер изменения контролируемого параметра, повышая требования к локальности с ростом величины и частоты его амплитудных колебаний вдоль направления контроля.

ЛИТЕРАТУРА

I. Смайт В. Электростатика и электродинамика, ГИИЛ, М., 1954.

2. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики, Новосибирск, "Наука", 1967.

3. Герасимов В.Г. Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. М., "Энергия", 1972.

4. Стратонович Р.А. Избранные вопросы теории флуктуации в радиотехнике, М., "Советское радио", 196I.

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника,М., "Советское радио", 1966.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., "Наука", 1973.

УДК 68I.325

В.Н.Буров, Ю.А.Маланичев

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ В ИНДУКЦИОННОМ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕ

В вопросе создания приборов эффективного обнаружения металлических тел важное значение имеет решение задачи автоматической